ДЕЦИБЕЛЫ

Е. А. ЗЕЛЬДИН

дБ

«ЭНЕРГИЯ»

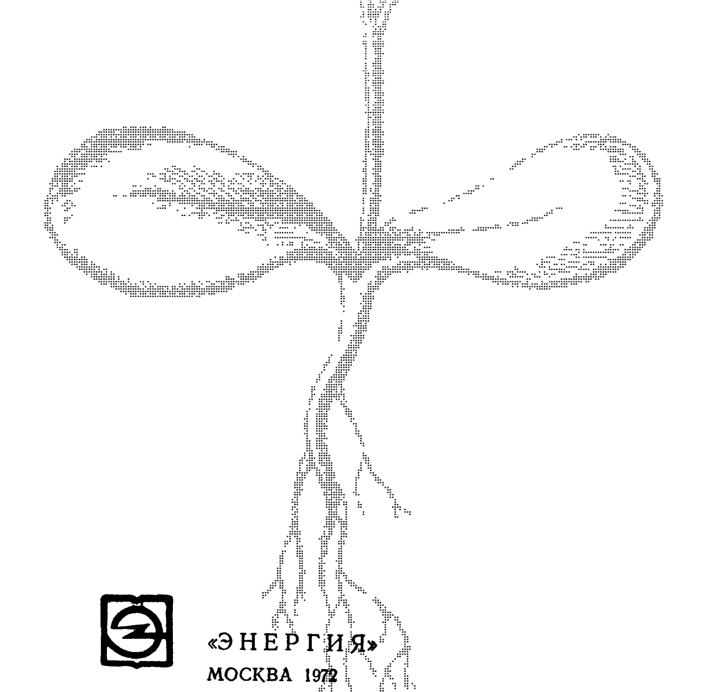


МАССОВАЯ
РАДИОБИБЛИОТЕКА

Выпуск 805

Е. А. ЗЕЛЬДИН

ДЕЦИБЕЛЫ



«ЭНЕРГИЯ»
МОСКВА 1972

6Ф2.9
З 50
УДК 621.3.081.4

Зельдин Е. А.

З 50 Децибелы, М., «Энергия», 1972.

56 с с ил. (Массовая радиобиблиотека. Вып. 805).

В брошюре формулируются понятия логарифмической единицы — децибел, ее особенности и методы использования в электронике, радиотехнике и акустике.

В справочном разделе приведены таблицы для нахождения децибел и непер и их взаимного пересчета.

Брошюра адресована широкому кругу радиолюбителей.

3-4-5 / 353-72 6Ф2.9

Евсей Аронович Зельдин

Децибелы

Редактор В. А. Фомичев
Редактор издательства В. А. Абрамов
Обложка художника А. М. Кувшинникова
Технический редактор Н. А. Галанчева
Корректор И. А. Володяева

Сдано в набор 25/XI 1971 г. Подписано к печати 24/IV 1972 г. Т-07542
Формат 84×108 1/32 Бумага типографская № 2
Усл. печ. л. 2,94 Уч.-изд. л. 3,87
Тираж 30 000 экз. Зак. 465 Цена 16 коп.

Издательство „Энергия". Москва, М-114, Шлюзовая наб., 10.

Московская типография № 10 Главполиграфпрома
Комитета по печати при Совете Министров СССР.
Шлюзовая наб., 10.

ВВЕДЕНИЕ

Логарифмические единицы — децибелы и неперы — широко используются при количественных оценках параметров различных устройств. В радиоэлектронике, проводной связи, технике записи и воспроизведения информации децибелы являются универсальной мерой и находят большое применение.

В действующих ныне государственных стандартах — ГОСТ 5651-64 «Приемники радиовещательные» более половины всех параметров приемников заданы в децибелах, в ГОСТ 13265-67 «Ленты магнитные неперфорированные для звукозаписи» из десяти норм по электроакустическим свойствам пленки девять выражены в децибелах. Перечень этот можно было бы продолжить.

В электроакустике и прикладной акустике децибел служит по существу единственной единицей для характеристики различных уровней — интенсивности звука, звукового давления, громкости, а также оценки эффективности средств борьбы с шумами.

В то же время, как показывает опыт, не только среди радиолюбителей, но и у профессионалов нередко бытуют неверные представления о логарифмических единицах, а при их применении часто совершаются ошибки.

Цель этой брошюры — дать читателю основные сведения о децибелах и неперах в пределах, достаточных для оперирования ими в практической деятельности. Особое внимание уделено изложению вопросов, связанных с использованием децибел в прикладных задачах радиоэлектроники и акустики.

ДЕЦИБЕЛЫ И ИХ СВОЙСТВА

Децибел — специфическая единица, не схожая ни с одной из тех, с которыми приходится встречаться в повседневной практике. Децибел не физическая величина, а математическое понятие. В этом отношении у этих единиц есть некоторое сходство с процентами. Как и проценты, децибелы безразмерны и служат для сравнения двух одноименных величин, в принципе самых различных, независимо от природы. Но если проценты выражают численно какую-то величину, сравнительно с целым, принятым за единицу (100%), то в основе децибела лежит более широкое понятие, характеризующее в общем случае отношение двух независимых, но, конечно, одноименных величин. Надо, однако, сразу оговориться, что хотя описываемые единицы пригодны для численной характеристики различных физических явлений термин «децибел» всегда связывают только с энергетическими величинами, чаще всего с мощностью и, с некоторыми оговорками, с ее составляющими — напряжением и током.

Для случая использования подобных единиц в оценке других явлений был предложен другой термин, о чем будет сказано далее.

Децибел (русское обозначение дБ, международное dB), как показывает приставка «деци», составляет десятую часть другой, более крупной единицы — бел[1] (русское обозначение Б, международное B). Бел — это десятичный логарифм отношения двух мощностей. Если известны две мощности P_1 и P_2, то их отношение, выраженное в белах, определяется формулой

$$N_{Б} = \lg \frac{P_2}{P_1}. \qquad (1)$$

Физическая природа сравниваемых мощностей не оговаривается и по существу может быть любой — электрической, электромагнитной, акустической, механической, — важно лишь, чтобы обе величины были выражены в одинаковых единицах — ваттах, милливаттах, лошадиных силах и т. п.

Напомним вкратце, что такое логарифм. Любое положительное число, как целое, так и дробное, можно представить другим числом, взятым в определенной степени. Например, $10=2^{3,32}=3^{2,1}=10^1=12^{0,926}=2,71^{2,3}$ и т. д.

Такой способ представления чисел в ряде случаев оказывается очень удобным при проведении сложных расчетов, так как позволяет подменять умножение — сложением, деление — вычитанием, возведение в степень — умножением, а извлечение корня — делением. Действительно, $10 \cdot 1\,000=10^1 \cdot 10^3=10^{1+3}=10^4=10\,000$, или $50 \cdot 25 \cdot 8=10^{1,699} \cdot 10^{1,398} \cdot 10^{0,903}=10^{1,699+1,398+0,903}=10^4$.

---

[1] По имени Александра Грехема Белла — изобретателя телефона.

Для простоты обычно не выписывают подробно все промежуточные действия, а пользуются сокращенными обозначениями. Так, если $10^2=100$, то 10 называют основанием логарифмов, а число 2 — логарифмом числа 100 и обозначают $\log_{10} 100=2$ или $\lg 100=2$ (читается так: «логарифм ста при основании десять равен двум»). Всякое положительное число имеет при любом положительном основании (кроме единицы) свой логарифм.

Логарифмы с основанием 10, так называемые десятичные логарифмы, наиболее удобны для практических расчетов и применяются чаще всего. Для чисел, кратных 10, этот логарифм численно равен количеству нулей за единицей, для остальных чисел — находится по таблицам логарифмов.

В высшей математике обычно пользуются так называемыми неперовыми[1] или натуральными логарифмами, основанием которых служит число $e=2{,}718\ldots$ В теории информации и программах электронных цифровых вычислительных машин преимущественно применяются логарифмы при основании 2.

Подробные сведения о логарифмах и действиях с ними можно найти в курсах алгебры.

Для практики бел слишком крупная величина, и даже большие отношения мощностей выражаются небольшим числом бел. Например, для $P_2/P_1=100$ $\lg 100=2$, а если $P_2/P_1=1\,000$, то $\lg 1\,000=3$, т. е. любые отношения мощностей в границах от 100 до 1 000 будут укладываться в пределах одного бела — от 2Б до 3Б. Для большей наглядности число, показывающее количество бел, умножают на десять и полученное произведение считают показателем децибел, т. е. 2Б = 20 дБ, 4,62Б = 46,2 дБ и т. п.

Обычно отношения мощностей выражают сразу в децибелах, для чего при расчетах пользуются формулой

$$D_p = 10 \lg \frac{P_2}{P_1}. \qquad (2)$$

Действия с децибелами не отличаются от операций с логарифмами и поэтому сумма двух чисел в децибелах эквивалентна произведению тех величин, которым она соответствует, а разность в децибелах характеризует отношение этих величин.

Подсчитаем, какому отношению мощностей соответствует один децибел:

$$10 \lg \frac{P_2}{P_1} = 1 \text{ дБ}; \quad \lg \frac{P_2}{P_1} = \frac{1}{10}; \quad \frac{P_2}{P_1} = 10^{\frac{1}{10}} = \sqrt[10]{10} = 1{,}259.$$

т. е. один децибел характеризует приращение первоначальной мощности примерно на 26%.

Для двух децибел: 2дБ = 1дБ + 1дБ $\sim 1{,}259 \cdot 1{,}259 = 1{,}259^2 = 1{,}585$,

3 дБ $\sim 1{,}259^3 = 1{,}995$, 7 дБ $\sim 1{,}259^7 = 5{,}012$,
4 дБ $\sim 1{,}259^4 = 2{,}512$, 8 дБ $\sim 1{,}259^8 = 6{,}310$,
5 дБ $\sim 1{,}259^5 = 3{,}161$, 9 дБ $\sim 1{,}259^9 = 7{,}943$,
6 дБ $\sim 1{,}259^6 = 3{,}981$, 10 дБ $\sim 1{,}259^{10} = 10{,}00$.

Знак $\sim$ означает «соответствует».

[1] Названы по имени Джона Непера — английского математика, открывшего в 1614 г. логарифмы и составившего первые таблицы логарифмов с основанием 2,718284590451828.

Подобным образом можно составить таблицу и для отрицательных значений децибел:

$$10 \lg \frac{P_1}{P_2} = -1; \ \lg \frac{P_1}{P_2} = -\frac{1}{10}; \ \frac{P_1}{P_2} = 10^{-\frac{1}{10}} = \frac{1}{\sqrt[10]{10}} = 0{,}794.$$

Минус один децибел характеризует потерю мощности $1/0{,}794 = 1{,}259$, т. е. тоже примерно на 26%.

Для минус двух децибел: $-2 дБ = -1 дБ + (-1 дБ) \sim 0{,}794 \cdot 0{,}794 = 0{,}794^2 = 0{,}631$,

-3 дБ $\sim 0{,}794^3 = 0{,}5012$, -7 дБ $\sim 0{,}794^7 = 0{,}1995$,
-4 дБ $\sim 0{,}794^4 = 0{,}3981$, -8 дБ $\sim 0{,}794^8 = 0{,}1585$,
-5 дБ $\sim 0{,}794^5 = 0{,}3162$, -9 дБ $\sim 0{,}794^9 = 0{,}1259$,
-6 дБ $\sim 0{,}794^6 = 0{,}2512$, -10 дБ $\sim 0{,}794^{10} = 0{,}100$.

Исходя из свойств логарифмов, можно отметить некоторые характерные особенности децибел.

Если $P_2 = P_1$, т. е. $P_2/P_1 = 1$, то $D_p = 0$, так как $\lg 1 = 0$.

Когда $P_2 > P_1$, то $P_2/P_1 > 1$ и $\lg \frac{P_2}{P_1} > 0$, т. е. число децибел положительно.

Если $P_2 < P_1$, то $P_2/P_1 < 1$, и тогда $D_p < 0$; это означает, что для этого случая децибелы выражаются отрицательными числами.

Положительные децибелы чаще всего характеризуют усиление и поэтому называются обычно децибелами усиления. Отрицательные децибелы, как правило, характеризуют потери энергии (в фильтрах, делителях, длинных линиях, волноводах) и называются децибелами потерь или затухания. Между децибелами усиления и затухания существует простая зависимость: одинаковому числу децибел с разными знаками соответствуют обратные числа отношений. Если, например, отношению $P_2/P_1 = 2 \sim 3$ дБ, то -3 дБ $\sim 1/2$, т. е. $1 : P_2/P_1 = P_1/P_2$.

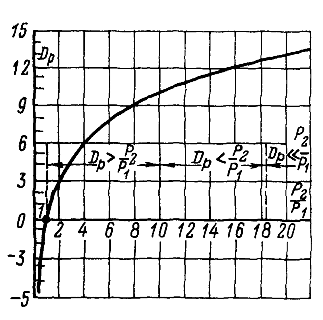


Рис. 1. График зависимости $D_p = 10 \lg \frac{P_2}{P_1}$.

Если P_2 или P_1 равно нулю, то выражение для D_p теряет смысл: согласно формуле (2) при числителе, стремящемся к нулю, $D_p = -\infty$, а при знаменателе, стремящемся к нулю, $D_p = \infty$.

И еще одна особенность — кривая, определяющая величину децибел в зависимости от отношения мощностей, вначале растет быстро, затем рост замедляется (рис. 1). Для положительных децибел в пределах первого десятка $D_p > P_2/P_1$, а дальше число, характеризующее децибелы, начинает отставать от отношения P_2/P_1, а при больших значениях P_2/P_1 $D_p \ll P_2/P_1$.

К достоинствам децибельной системы, обеспечившим ей широкое распространение, следует отнести универсальность, т. е. возможность использования при оценке различных параметров и явлений, натуральные числа, представляющие степени десяти, выражаются «круглым» числом децибел; огромные перепады преобразуе-

мых чисел — от единиц и до миллионов — отображаются в децибелах числами первой сотни, взаимообратные числа выражаются в децибелах равными числами, но с разными знаками, в децибелах могут быть выражены как отвлеченные, так и именованные числа, о чем будет сказано далее.

Следует иметь в виду и недостатки децибельной системы.

Малая наглядность: для преобразования децибел в отношения двух чисел и выполнения обратных действий нужны таблицы децибел или таблицы логарифмов и выполнение расчетов.

Отношения мощностей и отношения напряжений (или токов) пересчитываются в децибелы по разным формулам, что ведет иногда к путанице и ошибкам.

Децибелы могут отсчитываться только относительно условного, не равного нулю уровня, абсолютный нуль, например нуль ватт, нуль вольт, децибелами не выражается.

Решим пример на определение децибел. Какое усиление по мощности имеет транзисторный усилитель звуковой частоты, который развивает мощность 0,15 Вт (150 мВт) при входном сигнале 1,5 мВт.

Решение: $K_{p\,(дБ)} = 10\lg = \frac{150}{1,5} = 10\lg 100 = 10 \cdot 2 = 20$ дБ.

Если в этом примере положить усиление по мощности не 100 (20 дБ), а 50=100/2, то в децибелах это выразится как 20—3= =17 дБ (так как 3 дБ $\sim$ 1,995 $\approx$ 2), а усиление по мощности, равное 200=100 · 2, будет определяться как 20+3=23 дБ. Усиление по мощности в 400 раз равно 100 · 2 · 2 $\backsim$ 20+3+3=26 дБ, т. е. чтобы показать рост или уменьшение мощности вдвое, к первоначальному числу децибел нужно прибавить или отнять три децибела. Изменение мощности независимо от ее первоначальной величины не в 2 раза, а например, в 5 (в большую или меньшую сторону) поведет к увеличению или уменьшению числа децибел на 7 дБ.

Эту особенность децибел следует хорошо понять и твердо запомнить — она является одной из основ всей системы.

Попробуйте найти самостоятельно, какому отношению мощностей соответствуют 27 дБ, исходя из того, что 30 дБ $\sim P_2/P_1 =$ $= 1\,000$. (Ответ: 500).

Сравнение двух сигналов путем сопоставления их мощностей не всегда бывает удобным, так как для непосредственного измерения электрической мощности в диапазоне звуковых и радиочастот требуются дорогие и сложные приборы. В практических условиях, при работе с аппаратурой, гораздо проще измерять не мощность, которая выделяется на нагрузке, а падение напряжения на ней, а в некоторых случаях — протекающий ток.

Зная напряжение или ток и сопротивление нагрузки, легко определить мощность по одной из известных формул:

$$P = UI; \tag{3}$$

$$P = U^2/R; \tag{4}$$

$$P = I^2R, \tag{5}$$

где P — мощность, выделяющаяся на нагрузке; U — падение напряжения на ней; I — ток, протекающий через нагрузку; R — сопротивление нагрузки. С помощью этих формул можно находить числен-

ные выражения для децибел, не переводя напряжение или ток в мощность. Действительно, если обозначить $P_2 = U^2{}_2/R_2$, а $P_1 = U^2{}_1/R_1$ и подставить эти значения в основную формулу для расчета децибел (2), получится:

$$D_u = 10\lg\frac{P_2}{P_1} = 10\lg\left(\frac{U_2^2}{R_2}:\frac{U_1^2}{R_1}\right) = 10\lg\left(\frac{U_2^2}{U_1^2}\frac{R_1}{R_2}\right) =$$

$$= 10\lg\frac{U_2}{U_1} + 10\lg\frac{U_2}{U_1} - 10\lg\frac{R_2}{R_1} = 20\lg\frac{U_2}{U_1} - 10\lg\frac{R_2}{R_1}. \qquad (6)$$

Если проделать те же преобразования для случая, когда мощность выражается через ток, то, опуская промежуточные выкладки, будем иметь:

$$D_I = 10\lg\frac{I_2^2R_2}{I_1^2R_1} = 20\lg\frac{I_2}{I_1} + 10\lg\frac{R_2}{R_1}. \qquad (7)$$

Если сопротивления R_1 и R_2 в каждом из выражений (6) и (7) равны между собой или если измерения производятся на одном резисторе, то $10\lg\frac{R_2}{R_1} = 10\lg 1 = 0$ и формулы (6) и (7) упрощаются:

$$D_u = 20\lg\frac{U_2}{U_1}; \qquad (8)$$

$$D_I = 20\lg\frac{I_2}{I_1}. \qquad (9)$$

Последние две формулы очень часто применяются на практике.

Надо, однако, предостеречь от нередкой ошибки, когда формулами (8) и (9) неправильно пользуются для определения децибел, пренебрегая различиями в величинах сопротивлений, хотя это противоречит определению децибела как единицы отношения мощностей. Примером ошибки подобного рода может служить представление в децибелах коэффициента трансформации трансформатора. При этом в децибелы преобразуют отношение $U_2/U_1 = w_2/w_1 = n$, упуская из виду, что в трансформаторе не происходит преобразования мощности, так как изменениям напряжения соответствуют изменения тока в обратной пропорции. Если не считаться с потерями, то для трансформатора всегда $D_p = 0$ дБ.

При неравенстве сопротивлений нагрузки необходимо пользоваться формулами (6) или (7) либо напряжения и токи пересчитывать в мощности и только отношения мощностей преобразовывать в децибелы — результат будет одинаковым.

Пользуясь приемом, который был использован при составлении таблицы децибел мощности, можно аналогично определить, чему равен один децибел напряжения и тока:

положительный децибел

$$20\lg\frac{U_2}{U_1}=1 \text{ дБ};\quad \lg\frac{U_2}{U_1}=\frac{1}{20};$$

$$\frac{U_2}{U_1}=10^{\frac{1}{20}}=\sqrt[20]{10}=1,122,$$

отрицательный децибел

$$20\lg\frac{U_1}{U_2}=-1 \text{ дБ};\quad \lg\frac{U_1}{U_2}=-\frac{1}{20};$$

$$\frac{U_1}{U_2}=10^{-\frac{1}{20}}=\frac{1}{\sqrt[20]{10}}=0,8913,$$

т. е. один децибел напряжения или тока характеризует возрастание (убывание) этого параметра примерно на 12% по отношению к первоначальной величине.

2 дБ ~ $1,122^2=1,259$,	—2 дБ ~ $0,8913^2=0,7943$,
3 дБ ~ $1,122^3=1,413$	—3 дБ ~ $0,8913^3=0,7079$,
4 дБ ~ $1,122^4=1,585$,	—4 дБ ~ $0,8913^4=0,6310$,
5 дБ ~ $1,122^5=1,778$,	—5 дБ ~ $0,8913^5=0,5623$,
6 дБ ~ $1,122^6=1,995$,	—6 дБ ~ $0,8913^6=0,5012$,
7 дБ ~ $1,122^7=2,239$,	—7 дБ ~ $0,8913^7=0,4467$,
8 дБ ~ $1,122^8=2,512$,	—8 дБ ~ $0,8913^8=0,3981$,
9 дБ ~ $1,122^9=2,818$,	—9 дБ ~ $0,8913^9=0,3548$,
10 дБ ~ $1,22^{10}=3,162$	—1 дБ ~ $0,8913^{10}\approx 0,3162$.

Формулы (6) и (7) выводились в предположении, что между напряжениями U_2 и U_1 или токами I_2 и I_1 нет фазового сдвига, а сопротивления нагрузок имеют активный характер. Строго говоря, следовало бы рассматривать общий случай и учитывать для напряжений (токов) наличие угла сдвига по фазе, а для нагрузок не только активное, но и полное сопротивление, включая и реактивные составляющие. Если полные сопротивления, с которыми связаны U_2 и U_1 (или I_2 и I_1) не равны, то, поскольку для цепи переменного тока с учетом сдвига по фазе мощность

$$P=UI\cos\varphi=\frac{U^2}{Z}\cos\varphi=I^2Z\cos\varphi,$$

получим:

$$P_1=\frac{U_1^2}{Z_1}\cos\varphi_1=I_1^2Z_1\cos\varphi_1;$$

$$P_2=\frac{U_2^2}{Z_2}\cos\varphi_2=I_2^2Z_2\cos\varphi_2,$$

где Z_1 и Z_2 — полные сопротивления первой и второй цепей, а $\cos\varphi_1$ и $\cos\varphi_2$ — фазовые углы каждого из напряжений (или токов).

В этом случае формула для пересчета отношения мощностей в децибелы по известным напряжениям и сопротивлениям будет иметь следующий вид:

$$D_u = 10 \lg \frac{P_2}{P_1} = 10 \lg \left(\frac{U_2}{U_1}\right)^2 - 10 \lg \frac{Z_2}{Z_1} + 10 \lg \frac{\cos \varphi_2}{\cos \varphi_1} =$$

$$= 20 \lg \frac{U_2}{U_1} - 10 \lg \frac{Z_2}{Z_1} + 10 \lg \frac{\cos \varphi_2}{\cos \varphi_1}, \qquad (10)$$

а в случае, если известны токи,

$$D_I = 20 \lg \frac{I_2}{I_1} + 10 \lg \frac{Z_2}{Z_1} + 10 \lg \frac{\cos \varphi_2}{\cos \varphi_1} \ldots \qquad (11)$$

Однако в большинстве практических случаев, если нет специальной оговорки, можно считать, что $\cos \varphi_1 = \cos \varphi_2$, и тогда

$$\lg \frac{\cos \varphi_2}{\cos \varphi_1} = 0$$

и формулы для расчета децибел приобретают вид, подобный выражениям (6) и (7).

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДЕЦИБЕЛ ПО ТАБЛИЦАМ

Нет нужды каждый раз производить расчет децибел с использованием логарифмов. Существуют специальные таблицы для прямого перевода отношений мощностей и напряжений (токов) в децибелы и выполнения обратных действий. В приложении 1 дан пересчет положительных децибел в пределах от 0 до +20 дБ, что соответствует отношению напряжений или токов от 1,0 до 10,0 и отношению мощностей от 1,0 до 100,0 приложение 2 оформлено так же, но содержит отрицательные децибелы от 0 до —20 дБ, которые соответствуют отношениям напряжений (токов) от 1 до 0,1 и отношениям мощностей от 1 до 0,01. Порядок пользования табличным материалом не нуждается в пояснениях.

Эти таблицы применимы также для любых значений децибел и любых отношений мощностей, напряжений или токов. Если заданное значение децибел выходит за рамки таблиц, его следует представить в виде алгебраической суммы двух или нескольких чисел, входящих в таблицу, а соответствующие им отношения — мощностей или напряжений — перемножить. Для удобства преобразования исходное число децибел следует представить как сумму из 20 дБ (если требуется — несколько раз) и числа остатка, меньшего 20 дБ. Выполняя преобразования, удобно располагать соответственные числа одно под другим.

Пример 1. Найти отношения напряжений и отношения мощностей, соответствующие +56,7 дБ.

Решение: +56,7 дБ=20+20+16,7. По Приложению 1 для отношения напряжений находим: +20 дБ ~ 10; 16,7 дБ ~ 6,839; следовательно:

$$D_U = 20 + 20 + 16{,}7 = 56{,}7 \text{ дБ};$$

$$\frac{U_2}{U_1} = 10 \cdot 10 \cdot 6,839 = 683,9.$$

По той же таблице для отношения мощностей: +20 дБ ~ 100; 16,7 ~ 46,77 значит: $D_p = 20 + 20 + 16,7 = 56,7$;

$$\frac{P_2}{P_1} = 100 \cdot 100 \cdot 46,77 = 467\,700.$$

Пример 2. Найти отношение напряжений и отношение мощностей, соответствующие **—56,7 дБ.**

Решение: —56,7 дБ = —20 + (—20) + (—16,7).

Из приложения 2 для отношения напряжений находим: —20 дБ ~ 0,1; —16,7 дБ ~ 0,1462, следовательно,

$$D_U = -20 + (-20) + (-16,7) = -56,7 \text{ дБ};$$

$$\frac{U_2}{U_1} = 0,01 \cdot 0,1 \cdot 0,1462 = 0,001462;$$

из этой же таблицы для отношения мощностей: —20 дБ ~ 0,01; —16,7 дБ ~ 0,02138, значит,

$$D_p = -20 + (-20) + (-16,7) = -56,7 \text{ дБ};$$

$$\frac{P_2}{P_1} = 0,01 \cdot 0,01 \cdot 0,02138 = 0,000002138 = 2,138 \cdot 10^{-6}.$$

Подобным образом производятся и обратные преобразования: от отношения мощностей, напряжений или токов к децибелам. Разница состоит лишь в том, что заданное число следует представлять как произведение нескольких чисел, входящих в таблицу, а соответствующие им значения децибел алгебраически суммируются. Как и в первом случае, следует выбирать сомножители, удобные для дальнейших преобразований, 10 или 0,1 для отношений напряжений или токов и 100 или 0,01 для отношения мощностей. Последний сомножитель, не кратный 10, следует округлить до ближайшего табличного значения.

Пример 3. Пересчитать в децибелы отношение двух напряжений $U_2/U_1 = 55$.

Решение: Указанное отношение превышает величины, приведенные в приложении 1, поэтому его следует представить в виде сомножителей $55 = 5,5 \cdot 10$. Так как $U_2/U_1 = 5,5$ ~ 14,8 дБ, а $U_2/U_1 = 10$ ~ 20 дБ, то $U_2/U_1 = 55$ ~ 14,8 + 20 = 34,8 дБ.

Пример 4. Отношение двух напряжений $U_2/U_1 = 0,0024$. Какому числу децибел оно соответствует?

Решение: $U_2/U_1 = 0,0024 = 0,24 \cdot 0,1 \cdot 0,1$ ~ —12,4 дБ + (—20) + + (—20) = —52,4 дБ, так как $U_2/U_1 = 0,24$ ~ —12,4 дБ.

Последний пример можно решить иначе: $U_2/U_1 = 0,0024 = 2,4 \cdot 0,1 \cdot 0,1 \cdot 0,1$.

Из приложения 1 находим, что $U_2/U_1 = 2,4$ ~ +7,6 дБ. Следовательно, $U_2/U_1 = 2,4 \cdot 0,1 \cdot 0,1 \cdot 0,1 = 0,0024$,

$$D_u = +7,6 + (-20) + (-20) + (-20) = -52,4 \text{ дБ}.$$

Попробуйте найти самостоятельно, какому значению децибел соответствуют следующие отношения: а) $U_2/U_1 = 712$; б) $P_2/P_1 = 224$; в) $U_2/U_1 = 0,0131$; г) $P_2/P_1 = 0,00371$.

Ответы: а) 57,1 дБ; б) 23,5 дБ; в) —37,6 дБ; г) —24,3 дБ.

Полезно запомнить некоторые часто встречающиеся на практике значения децибел и характеризующие их отношения мощностей и напряжений (токов):

Таблица 1

± дБ	3	10	20	30
P_2/P_1	2; 0,5	10; 0,1	100; 0,01	1 000; 0,001
± дБ	3	10	20	40
U_2/U_1 или I_2/I_1	$\sqrt{2}=1,41$; $\frac{1}{\sqrt{2}}=0,707$	$3,16$; $\frac{1}{3,16}=0,316$	10; 0,1	100; 0,01

СОПОСТАВЛЕНИЕ ДЕЦИБЕЛ С ПРОЦЕНТАМИ

Ранее отмечалось, что понятие децибел имеет некоторое сходство с процентами. Действительно, так как в процентах выражается отношение какого-то числа к другому, условно принятому за сто процентов, отношение этих чисел также можно представить в децибелах при условии, что оба числа характеризуют мощность, напряжение или ток. Для отношения мощностей

$$D_p = 10\lg\left(\frac{P_2}{P_1}\,\%\right)\left(\frac{1}{100}\right) = 10\lg\left(\frac{P_2}{P_1}\,\%\right) - 20. \qquad (12)$$

Для отношения напряжений или токов

$$D_u = 20\lg\left(\frac{U_2}{U_1}\,\%\right)\left(\frac{1}{100}\right) = 20\lg\left(\frac{U_2}{U_1}\,\%\right) - 40. \qquad (13)$$

Можно также вывести формулы для пересчета децибел в проценты от отношения

$$\frac{P_2}{P_1}\,\% = 10^{\frac{D_p+20}{10}}; \qquad (14)$$

$$\frac{U_2}{U_1}\,\% = 10^{\frac{D_u+40}{20}}. \qquad (15)$$

Таблица 2

%	100	50	10	1	0,1
D_u или D_I	0	—6	—20	—40	—60
D_p	0	—3	—10	—20	—30

В табл. 2 дан перевод некоторых, наиболее часто встречающихся значений децибел в проценты отношений. Различные промежуточные значения можно найти по номограмме рис. 2.

Рассмотрим два практических примера, поясняющих перевод процентного отношения в децибелы.

Какому уровню гармоник в децибелах по отношению к уровню сигнала основной частоты соответствует коэффициент нелинейных искажений в 3%? Воспользуемся рис. 2. Через точку пересечения вертикальной линии 3% с графиком «напряжение» мысленно проведем горизонтальную линию до пересечения с вертикальной осью и получим ответ: —31 дБ.

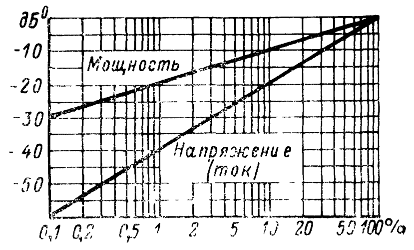


Рис. 2. Пересчет децибел в проценты от отношений.

Какому ослаблению напряжения в процентах соответствует его изменение на —6 дБ? Ответ — на 50% от первоначальной величины.

Если исходное напряжение снизится до 10%, то это будет означать, что уровень напряжения уменьшился на 20 дБ.

В практических расчетах дробную часть численного значения децибел часто округляют до целого числа по правилам приближенных вычислений. При этом в результаты расчетов или измерений, естественно, вносится дополнительная погрешность, ввиду чего округление следует выполнять сознательно, не в ущерб требуемой точности.

Выполняя округление дробной части, мы допускаем следующие относительные ошибки в процентах от основной величины в децибелах (табл. 3).

Таблица 3

дБ	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7
% от U_2/U_1	1,2	2,3	3,5	4,7	5,9	7,2	8,4
% от P_2/P_1	2,3	4,7	7,2	9,6	12,2	14,8	17,5

Продолжение табл. 3

дБ	0,8	0,9	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0
% от U_2/U_1	9,6	10,9	12,2	18,9	25,9	33,4	41,3
% от P_2/P_1	20,3	23,0	25,9	41,3	58,5	77,8	99,5

ДЕЦИБЕЛЫ В РАДИОЭЛЕКТРОНИКЕ

Пользуясь приведенными выше сведениями, можно производить расчеты, связанные с использованием децибельной системы. Ниже подробно разбираются примеры, поясняющие методику использования децибел при количественной оценке разных явлений и процессов. В небольшом объеме брошюры нет возможности разобрать все возможные случаи использования этих единиц, однако, овладев общим методом, читатель сможет самостоятельно применять его в решении различных практических задач.

Потери энергии в линии или кабеле на единицу длины характеризуются коэффициентом затухания β, который при равном входном и выходном сопротивлениях линии определяется в децибелах:

$$\beta = 20 \lg \frac{U_2}{U_1},$$

где U_1 — напряжение в произвольном сечении линии; U_2 — напряжение в другом сечении, отстоящем от первого на единицу длины 1 м, 1 км и т. д. Высокочастотный кабель типа РК-1 имеет на частоте 100 Мгц коэффициент затухания $\beta = -0{,}096$ дБ на метр длины (эти цифры приводятся в справочных данных для кабелей). Найти, каким будет напряжение на выходе отрезка кабеля длиной $l=50$ м, если ко входу его приложено напряжение 8 В указанной частоты. Сопротивление нагрузки и волновое сопротивление кабеля равны или, как говорят, согласованы между собой.

Очевидно, что затухание, вносимое отрезком кабеля, составит $K = -0{,}096$ дБ/м · 50 м $= -4{,}8$ дБ. Из Приложения 2 следует, что $-4{,}8$ дБ $\sim U_2/U_1 = 0{,}5754 \approx 0{,}58$. Значит, напряжение на выходном конце кабеля $U_2 = 8$ В · 0,58 = 4,64 В.

Этот пример иллюстрирует очень важное положение: потери в линии или кабеле с ростом их длины возрастают чрезвычайно быстро. Для отрезка кабеля длиной в 1 км затухание составит $K = -0{,}096 \cdot 1000 = -96$ дБ, т. е. сигнал ослабится в 63 000 раз! В линиях звуковой частоты затухание колебаний гораздо меньше, но закон затухания тот же, и при большой длине линии ослабление будет весьма существенным.

В схемы усилителей звуковой частоты с целью повышения их качественных показателей часто вводится отрицательная обратная связь. Если коэффициент усиления устройства по напряжению без обратной связи равен K, а с обратной связью $K_{о\,с}$, то число, показывающее, во сколько раз изменяется коэффициент усиления под действием обратной связи, называют глубиной обратной связи. Этот параметр обычно выражают в децибелах. В действующем усилителе K и $K_{о\,с}$ могут быть найдены экспериментально, если только усилитель не станет самовозбуждаться при разомкнутой петле обратной связи. В случае проектирования усилителя, когда параметры схемы определяются расчетным путем, сначала вычисляется K, а значение $K_{о\,с}$ определяется следующим образом.

$$K_{о\,с} = \frac{K}{1 + \beta K},$$

где β — коэффициент передачи цепи обратной связи, т. е. отношение напряжения на выходе цепи обратной связи к напряжению на ее входе.

Глубина обратной связи в децибелах может быть, следовательно, рассчитана по формуле

$$A = 20 \lg \frac{K}{K_{\text{о с}}} = 20 \lg (1 + \beta K).$$

Пример. найти глубину обратной связи, если $K = 1\,000$, $\beta = 0{,}02$.

Решение: $A = 20 \lg (1 + 0{,}02 \cdot 1000) = 26{,}4$ дБ.

На выходе любого приемно-усилительного устройства даже при отсутствии полезного входного сигнала можно обнаружить переменное напряжение, которое вызвано собственными шумами устройства. Слово «шум» имеет здесь не акустический, а общий, собирательный, смысл непрерывной помехи, мешающее действие которой проявляется по-разному в различных выходных устройствах: шипение в громкоговорителе, в виде «снега» на экране телевизора, подергивание пера в самописцах, уход стрелки от нулевого значения у вольтметров и т. п. Причины, вызывающие собственные шумы, могут быть как внешними — за счет наводок, плохой фильтрации напряжения питания, так и внутренними, обусловленными хаотическим движением носителей тока в электронных приборах и деталях схемы. Сильнее всего сказываются шумы и помехи, возникающие во входных цепях и в первом усилительном каскаде, так как они усиливаются всеми последующими каскадми. Собственные шумы являются неблагоприятным фактором, так как они ухудшают реальную чувствительность приемника или усилителя.

Количественная оценка шумов осуществляется несколькими способами.

Простейший состоит в том, что все шумы, независимо от причины и места их возникновения, пересчитываются ко входу, т. е. напряжение шумов на выходе (при отсутствии входного сигнала) делится на коэффициент усиления

$$U_{\text{ш вх}} = \frac{U_{\text{ш вых}}}{K}, \text{ мкВ.}$$

Это напряжение, выраженное в микровольтах, и служит мерой собственных шумов. Однако для оценки устройства с точки зрения помех важно не абсолютное значение шумов, а отношение между полезным сигналом и этим шумом (отношение сигнал—шум), так как полезный сигнал должен надежно выделяться на фоне помех. Отношение сигнал—шум обычно выражают в децибелах

$$F_{\text{с ш}} = 10 \lg \frac{P_{\text{с}}}{P_{\text{ш}}} = 20 \lg \frac{U_{\text{с}}}{U_{\text{ш}}}, \qquad (16)$$

где $P_{\text{с}}$ — заданная или номинальная выходная мощность полезного сигнала, сложенная с шумом $P_{\text{ш}}$ — выходная мощность шумов при выключенном источнике полезного сигнала; $U_{\text{с}}$ — напряжение сигнала и шумов на нагрузочном сопротивлении; $U_{\text{ш}}$ — напряжение шумов на том же сопротивлении.

Очевидно, что для успешной эксплуатации устройства отношение $U_{\text{с}}/U_{\text{ш}}$ должно быть выше какого-то минимально допустимого значения, которое зависит от назначения и требований, предъявляемых к устройству. Для радиовещательных приемников, например, отношение напряжения полезного сигнала к напряжению шу-

мов должно быть не менее 20 дБ в диапазонах длинных, средних и коротких волн и не менее 26 дБ в диапазоне УКВ.

Иногда на практике пользуются обратным отношением $U_ш/U_с$, характеризуя им уровень шумов относительно полезного сигнала. Уровень шумов выражается тем же числом децибел, что и отношение сигнал — шум, но с отрицательным знаком.

В описаниях приемно-усилительной аппаратуры иногда фигурирует термин «уровень фона», который отличается от уровня шумов тем, что характеризует в децибелах отношение составляющих напряжения фона к напряжению, соответствующему заданной номинальной мощности. Составляющие фона кратны частоте питающей сети (50, 100, 150 и 200 Гц) и при измерении выделяются из общего напряжения помех при помощи полосовых фильтров. Для электрофонов, воспроизводящих записи с граммофонных пластинок, согласно ГОСТ 11157-65 уровень фона по напряжению для всего тракта должен быть не хуже: для устройств высшего класса —50 дБ, I класса —46 дБ, II и III классов соответственно —40 и —34 дБ.

Отношение сигнал — шум не позволяет, однако, судить о том, какая часть шумов обусловлена непосредственно элементами схемы, а какая внесена за счет несовершенства конструкции (наводки, фон). Для оценки шумовых свойств электронных приборов введено понятие коэффициента (фактора) шума. Коэффициент шума оценивается по мощности и также выражается в децибелах. Характеризовать этот параметр можно следующим образом. Если на входе устройства (приемника, усилителя) одновременно действуют полезный сигнал мощностью $P_с$ и шумы мощностью $P_ш$ (за счет шумов в антенне, колебательных контурах, резисторах), то отношение сигнал—шум на входе будет $(P_с/P_ш)_{вх}$. После усиления отношение $(P_с/P_ш)_{вых}$ окажется меньше, так как к входным шумам добавятся и усиленные собственные шумы усилительных каскадов. Коэффициентом шума называют выраженное в децибелах отношение

$$F_ш = 10 \lg \frac{(P_с/P_ш)_{вх}}{(P_с/P_ш)_{вых}} = 10 \lg \frac{1}{K_p} \cdot \frac{P_{ш\,вых}}{P_{ш\,вх}}, \qquad (17)$$

где K_p — коэффициент усиления по мощности. Значение $P_{ш\,вх}$ определяется расчетным путем, $P_{ш\,вых}$ измеряется, а K_p обычно известно из расчета или после измерения. Идеальный с точки зрения шумов усилитель должен усиливать только полезные сигналы и не должен вносить дополнительных шумов. Как следует из уравнения (17), для подобного усилителя коэффициент шума $F_ш = 0$ дБ.

Для транзисторов, предназначенных для работы в первых каскадах приемно-усилительных устройств, коэффициент шума регламентируется и приводится в справочниках. Из отечественных транзисторов массового производства самый низкий коэффициент шума имеют германиевые транзисторы типа ГТ-322А ($F_ш = 1,5 \div 4$ дБ), для транзисторов типа П27А, П28 $F_ш = 5$ дБ, у транзисторов массового применения типа МП39Б и МП36А $F_ш = 5 \div 12$ дБ. Шумы кремниевых транзисторов несколько выше, например, для МП101А $F_ш \leqslant 12$ дБ, для МП111А $F_ш = 7 \div 15$ дБ.

Напряжение собственных шумов определяет и другой важный параметр многих устройств — динамический диапазон. Динамическим диапазоном называется выраженное в децибелах отношение максимальной неискаженной выходной мощности к ее минималь-

ному значению, при котором еще обеспечивается допустимое отношение сигнал — шум.

$$Д = 10 \lg \frac{P_{\text{вых макс}}}{P_{\text{вых мин}}} = 20 \lg \frac{U_{\text{вых макс}}}{U_{\text{вых.мин}}}. \quad (18)$$

Чем меньше уровень собственных шумов и чем выше неискаженная выходная мощность, тем шире динамический диапазон.

Сходным образом определяется и динамический диапазон источников звука — оркестра, голоса, только здесь минимальная мощность звука определяется шумом аудитории.

Чтобы устройство могло передать без искажений как минимальную, так и максимальную амплитуды входного сигнала, его динамический диапазон должен быть не меньше динамического диапазона сигнала. В случаях, когда динамический диапазон входного сигнала превышает динамический диапазон устройства, его искусственно сжимают. Так поступают, например, в радиовещании и при звукозаписи.

Разберем, как характеризуются в децибелах некоторые параметры радиоприемников.

Избирательность (ослабление соседнего канала), ослабление сигнала зеркального канала и ослабление напряжения сигнала промежуточной частоты характеризуют способность приемника отделять полезный сигнал от мешающих в первом случае, когда сигнал помехи по частоте не намного отличается от основного, во втором — когда сигнал помехи отличается на удвоенную величину промежуточной частоты, в третьем — когда частота сигнала помехи равна промежуточной частоте приемника.

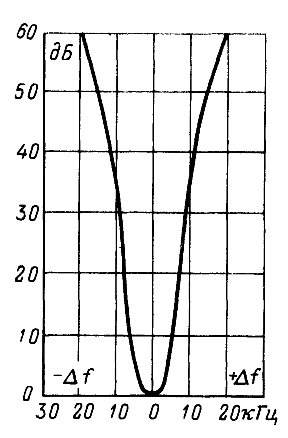


Рис. 3. Кривая избирательности приемника.

Для проверки избирательности на вход приемника через эквивалент антенны от генератора стандартных сигналов подают модулированное напряжение. Приемник и генератор должны быть настроены на одну частоту. Регулятор громкости устанавливается в положение, при котором на нагрузке приемника развивается напряжение, обеспечивающее определенную выходную мощность,—для радиовещательных приемников 50 мВт. Затем при постоянной настройке приемника частота генератора стандартных сигналов изменяется поочередно на определенную величину в обе стороны от положения точной настройки [кривая избирательности (рис. 3) может быть несимметричной], после чего каждый раз на входе приемника устанавливается такое напряжение, при котором на его выходе опять будет напряжение, равное первоначальному. Согласно стандартам для радиовещательных приемников изменение частоты должно составлять ±10 кГц. Отношение напряжения генератора стандартных сигналов при расстройке его частоты на ±10 кГц к напряжению при точной настройке, выраженное в децибелах, является показателем избирательности. Из двух результатов измерений во внимание принимается худший. Для радиовещательных приемников

в диапазонах длинных и средних волн по нормам установлены следующие величины избирательности: приемники высшего класса —60 дБ, I класса —46 дБ, II класса —34 дБ, III класса —24 дБ.

Для оценки ослабления сигнала зеркального канала применяется та же методика измерения, но частота генератора стандартных сигналов изменяется на величину двойного значения промежуточной частоты приемника — в сторону высших частот, если частота гетеродина выше принимаемой, и в направлении меньших частот при частоте гетеродина, ниже принимаемой.

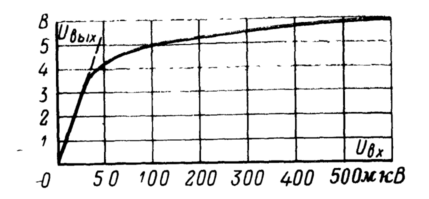


Рис. 4. Амплитудная характеристика приемника с автоматической регулировкой усиления.

Показателем ослабления сигнала зеркального канала служит отношение выходного напряжения генератора стандартных сигналов при расстройке к напряжению при точной настройке, выраженное в децибелах. Нормы по этому показателю зависят не только от класса приемника, но и от диапазона волн. Для приемника I класса, например, в диапазоне длинных волн ослабление сигнала должно быть не менее 46 дБ, в диапазоне средних волн 26 дБ и на коротких волнах 14 дБ.

Подобным образом проверяется и ослабление сигнала промежуточной частоты: отношение напряжения сигнала промежуточной частоты к напряжению частоты настройки, выраженное в децибелах, является показателем ослабления. Измерения должны производиться при наиболее неблагоприятных частотах настройки приемника — 408 и 520 кГц при промежуточной частоте 465 кГц.

Эффективность действия системы автоматической регулировки усиления радиоприемников (АРУ) также выражается в децибелах. Назначение АРУ — поддерживать напряжение на выходе приемника на относительно неизменном уровне при значительных изменениях напряжения радиочастоты на его входе. Типовая амплитудная характеристика приемника с АРУ показана на рис. 4. Для проверки действия АРУ на вход приемника от генератора стандартных сигналов через эквивалент антенны подается модулированное напряжение высокой частоты. Величина входного сигнала должна иметь максимальное заданное значение. Выходная мощность с помощью регулятора громкости устанавливается равной четверти номинальной. Затем напряжение генератора стандартных сигналов уменьшают в заданное число раз. Отношение напряжений звуковой частоты на выходе приемника при максимальном и минимальном напряжении высокой частоты на входе, выраженное в децибелах, характеризует эффективность работы системы АРУ.

Измерения проводят на частоте 1 МГц. У радиовещательных приемников I класса при изменении входного напряжения на 40 дБ, напряжение на выходе должно изменяться не более чем на 12 дБ Для приемников II класса эти цифры должны быть соответственно 26 и 10 дБ, а для приемников III и IV классов 26 и 12 дБ.

Эффективность действия ручного регулятора громкости (РРГ) проверяется при двух крайних положениях регулятора. Сначала при регуляторе в положении максимальной громкости на вход усилителя звуковой частоты подается напряжение частотой 1 кГц такой величины, чтобы на выходе усилителя установилось напряжение, соответствующее мощности 50 мВт. Затем ручку регулятора громкости переводят на минимальную громкость, а напряжение на входе усилителя поднимают до тех пор, пока напряжение на выходе снова не станет равным первоначальному. Отношение входного напряжения при регуляторе в положении минимальной громкости к входному напряжению при максимальной громкости, выраженное в децибелах, является показателем работы регулятора громкости.

Разобранными примерами далеко не исчерпываются практические случаи приложения децибел к оценке параметров радиоэлектронных устройств. Зная общие правила применения этих единиц, можно понять, как они используются в других, не рассмотренных здесь условиях. Встретившись с незнакомым термином, определенным в децибелах, следует отчетливо представить, отношению каких двух величин он соответствует. В одних случаях это понятно из самого определения, как, например, требование к магнитофону, чтобы относительный уровень проникновения с соседней дорожки записи не превышал —35 дБ (из ГОСТ 12392-66 «Магнитофоны бытовые»). В других случаях связь между составляющими сложнее, и, когда нет четкой ясности, следует обратиться к описанию методики измерения во избежание серьезных ошибок.

Оперируя с децибелами, следует всегда обращать внимание на то, отношению каких единиц — мощности или напряжения — соответствует каждый конкретный случай, т. е. какой коэффициент — 10 или 20 — должен стоять перед знаком логарифма.

ЛОГАРИФМИЧЕСКИЕ АМПЛИТУДНО-ЧАСТОТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Логарифмическая система, в том числе и децибелы, очень часто применяется при построении амплитудно-частотных (или просто частотных) характеристик — кривых, изображающих зависимость коэффициента передачи $K=U_{вых}/U_{вх}$ различных устройств (усилителей, делителей, фильтров, систем автоматического регулирования) от частоты внешнего воздействия.

Для построения частотной характеристики опытным путем или расчетом определяется ряд точек, характеризующих выходную мощность или выходное напряжение при неизменной величине входного напряжения разных частот.

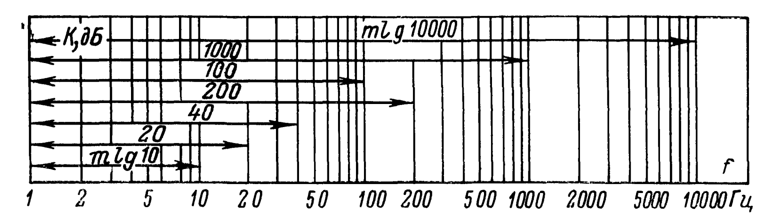


Рис. 5. Построение логарифмического масштаба.

Частотные характеристики строятся обычно в так называемом логарифмическом масштабе. По оси частот в произвольном масштабе m откладываются величины, пропорциональные не самой частоте, а ее логарифму $m \lg 10$; $m \lg 100$; $m \lg 1000$, т. е. $1m$, $2m$, $3m, \ldots$, а надписываются значения частот (10, 100, 1 000... Гц). Логарифмический масштаб позволяет на небольшом отрезке оси отображать широкий диапазон частот. На такой оси одинаковым отношениям двух частот соответствуют равные по длине участки. Отрезок оси, характеризующий рост частоты в десять раз, называют декадой, двукратному отношению частот соответствует октава (этот термин заимствован из теории музыки). По вертикальной оси откладываются в децибелах отношения коэффициентов передачи при разных частотах к его максимальному либо среднему значению (рис 5).

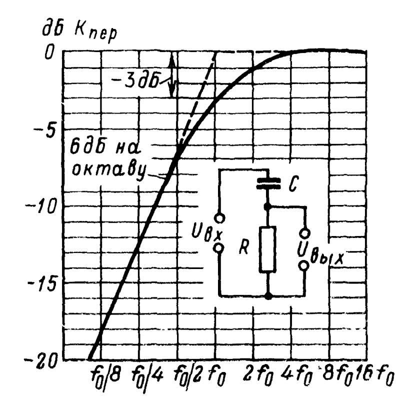


Рис. 6. RC-фильтр высших частот и его логарифмическая амплитудно-частотная характеристика (ЛАХ).

Построение частотных характеристик по точкам представляет трудоемкую операцию, особенно в тех случаях, когда по характеристикам отдельных каскадов надо определить результирующую кривую. Эта задача упрощается, если пользоваться приближенным способом, основанным на представлении амплитудно-частотных характеристик в виде отрезков прямых, сопрягающихся под углом друг с другом. Такие характеристики называют асимптотическими логарифмическими амплитудно-частотными характеристиками, или, короче, логарифмическими амплитудными характеристиками (ЛАХ).

Построение логарифмической амплитудно-частотной характеристики рассмотрим на примере простой частотно-зависимой цепи, состоящей из последовательно включенных конденсатора, емкости C и резистора, сопротивления R (рис. 6). Эта цепь широко применяется в качестве простого фильтра высших частот для отделения переменной составляющей напряжения от постоянной, для дифференцирования импульсных и непрерывных сигналов.

Емкостное сопротивление конденсатора определяется формулой

$$X_c = \frac{1}{2\pi f C}, \tag{19}$$

где f — частота напряжения, приложенного к конденсатору.

Сопротивление R резистора от частоты не зависит. Общее сопротивление цепи равно:

$$Z = \sqrt{R^2 + X_c^2}. \tag{20}$$

Ток, протекающий по цепи,

$$I = \frac{U_{вх}}{Z} = \frac{U_{вх}}{\sqrt{R^2 + X_c^2}}. \quad (21)$$

Выходное напряжение (напряжение на резисторе)

$$U_{вых} = IR = \frac{U_{вх} R}{\sqrt{R^2 + X_c^2}} \quad (22)$$

и коэффициент передачи

$$K = \frac{U_{вых}}{U_{вх}} = \frac{U_{вх} R}{U_{вх} \sqrt{R^2 + X_c^2}} = \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{X_c^2}{R^2}}}. \quad (23)$$

Как следует из формулы (19), для входного напряжения низкой частоты емкостное сопротивление конденсатора велико, но с ростом частоты быстро падает. Существует, очевидно, определенная частота f_0, при которой $X_c = R$. Частота f_0, при которой обеспечивается это условие, называется граничной. Она определяется из условия равенства емкостного и активного сопротивлений:

$$R = \frac{1}{2\pi f_0 C},$$

откуда

$$f_0 = \frac{1}{2\pi RC}. \quad (24)$$

Для граничной частоты на основании (23)

$$K_0 = \frac{1}{\sqrt{1+1}} = \frac{1}{\sqrt{2}} = 0{,}707 \sim -3 \text{ дБ}.$$

Если рассчитать коэффициент передачи для разных частот по формуле (23), подставив в нее значение X_c из формулы (19), то график амплитудно-частотной характеристики рассматриваемой цепи будет иметь вид, показанный на рис. 6 сплошной линией. Ход этой кривой одинаков при любых комбинациях R и C, и поэтому вместо конкретных значений частот на чертеже приведены относительные с интервалом в одну октаву.

Рассмотрим, как зависит коэффициент передачи K от частоты в области частот $f \ll f_0$. Согласно формуле (19) в этом случае X_c много больше R, и поэтому в выражении (23) величиной R^2 в знаменателе можно пренебречь, следовательно,

$$K = \frac{U_{вх} R}{U_{вх} \sqrt{R^2 + X_c^2}} \approx \frac{R}{X_c} = 2\pi f RC.$$

Отсюда следует, что K растет пропорционально частоте f. Значит, при увеличении или уменьшении f в 2 раза (на октаву) K уве-

личится (уменьшится) тоже в 2 раза (или на 6 дБ по напряжению). Таким образом, зависимость коэффициента передачи от частоты может быть представлена прямой линией, наклонной к горизонтальной оси, имеющей наклон (или, как говорят, крутизну) 6 дБ/окт. Иногда применяется эквивалентное обозначение 20 дБ/дек, так как изменению частоты в 10 раз (на декаду) соответствует изменение коэффициента передачи в 10 раз (на 20 дБ по напряжению).

Как ведет себя K в области частот $f \gg f_0$? По аналогии с рассмотренным случаем в этой области пренебрежем в формуле (23) величиной X_c, так как здесь $X_c \ll R$, и формула (23) примет вид:

$$K = \frac{U_{вх}R}{U_{вх}\sqrt{R^2 + X_c^2}} \approx \frac{R}{R} = 1 \sim 0\,дБ,$$

т. е. коэффициент передачи не зависит от частоты и изображается прямой горизонтальной линией на уровне 0 дБ.

Для того чтобы определить, при какой частоте пересекаются наклонный и горизонтальный участки зависимости K от f, следует приравнять два последних выражения, т. е.

$$2\pi fRC = 1,$$

откуда

$$f = \frac{1}{2\pi RC}.$$

Но эта формула совпадает с (24), следовательно, граничная частота кривой совпадает с частотой сопряжения двух прямых или, как ее еще называют, частотой среза.

На рис. 6 пунктиром показана асимптотическая логарифмическая амплитудно-частотная характеристика. Из рисунка видно также, что наибольшее расхождение в обоих графиках имеет место на участке у сопрягающей частоты. Максимальная ошибка, которая при этом вносится, равна —3 дБ. На отделении в одну октаву от частоты сопряжения отклонение асимптотической характеристики от точной ≈ 1 дБ, а за пределами ± 2 октавы от частоты сопряжения обе характеристики, точная и приближенная, практически совпадают.

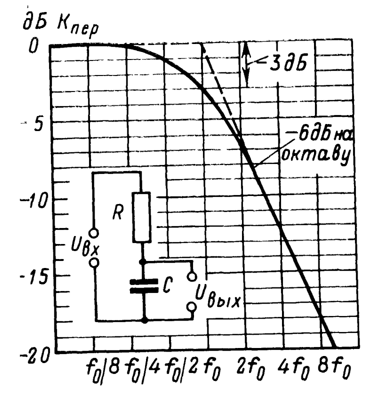


Рис. 7. RC-фильтр низших частот и его логарифмическая амплитудно-частотная характеристика (ЛАХ).

Частота, при которой коэффициент передачи уменьшается на —3 дБ, обычно условно считают границей полосы пропускания различных частотно-зависимых устройств. Эта частота, как отмечалась ранее, совпадает с частотой среза.

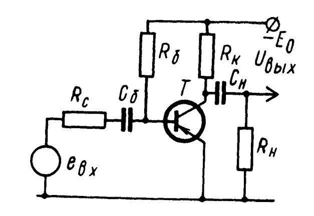
Для построения асимптотической ЛАХ конкретной цепи рассматриваемого типа надо проделать следующее.

1. Определить f_0 по формуле (24), исходя из заданных R и C, с обязательным соблюдением размерностей входящих величин.

2 Из точки, находящейся на пересечении линий f_0 и 0 дБ (рис 6) провести линию влево вниз с крутизной 6 дБ/окт и вправо — горизонтальную линию на уровне 0 дБ.

Чтобы построить реальную характеристику на основе ЛАХ, надо на вертикальной линии f_0 из точки перегиба отложить вниз отрезок, равный 3 дБ, а на линиях $f_0/2$ и $2f_0$ — также вниз — отрезки по 1 дБ, затем полученные точки соединить плавной кривой, концы которой асимптотически приближаются к прямым линиям.

В тех случаях, когда устройство содержит несколько частотно-зависимых каскадов, сквозная ЛАХ представляет алгебраическую сумму частотных характеристик отдельных каскадов. Последовательное включение двух одинаковых RC-цепочек, подобных показанным на рис. 6, даст крутизну фронта 12 дБ/окт (40 дБ/дек), трех — 18 дБ/окт (60 дБ/дек).



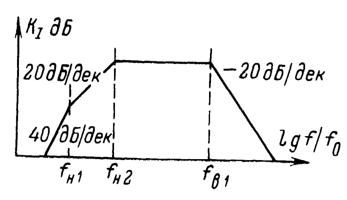


Рис. 8. Транзисторный резистивный усилитель и его логарифмическая амплитудно-частотная характеристика.

Сходным образом можно построить амплитудно-частотную характеристику RC-цепочки для случая, когда выходной сигнал снимается с конденсатора (рис. 7). Подобная цепь используется в роли фильтра низших частот, для интегрирования (усреднения) сигналов, меняющихся по амплитуде, в устройствах для временной задержки. В любом резистивном усилителе в неявном виде имеются подобные цепочки, образованные паразитными емкостями и входными и выходными сопротивлениями активных элементов (ламп, транзисторов) и сопротивлениями нагрузок. В усилителях эти цепи являются причиной завала частотных характеристик в области высших частот.

Как и в предыдущем случае, общее сопротивление и ток, протекающий в цепи, описываются уравнениями (20) и (21), а выходной сигнал (напряжение на конденсаторе)

$$U_{вых} = IX_c = \frac{U_{вх}X_c}{\sqrt{R^2 + X_c^2}};$$

следовательно, коэффициент передачи

$$K_{пер} = \frac{U_{вых}}{U_{вх}} = \frac{U_{вх}X_c}{U_{вх}\sqrt{R^2 + X_c^2}} = \frac{1}{\sqrt{1 + R^2/X_c^2}}.$$

Амплитудно-частотная характеристика рассматриваемой цепи изображена на рис. 7 сплошной линией, а ее ЛАХ — пунктирной. Сравнительно с характеристиками, показанными на рис. 6, они представляют зеркальное отображение относительно вертикальной оси

и обладают сходными свойствами. Наклон падающего участка выражается отрицательными числами, в данном случае — 6 дБ/окт.

Хотя логарифмическим амплитудным частотным характеристикам и свойственна меньшая точность, чем обычным амплитудно-частотным характеристикам, они получили большое распространение, так как с их помощью гораздо проще и удобнее анализировать частотные свойства различных устройств: вместо расчета многих точек и построения кривых для проведения прямой линии достаточно двух точек. Логарифмические амплитудные характеристики позволяют быстро оценивать, как влияют величины отдельных деталей на частотную характеристику, и определять, как выглядит сквозная характеристика при наличии нескольких частотно-зависимых каскадов.

На рис. 8 показана схема простейшего транзисторного усилителя и его ЛАХ. В области низших частот выходное напряжение определяется параметрами двух независимых RC-цепочек — входной и выходной — и ЛАХ имеет две точки излома. Частоты сопряжения могут быть вычислены по формулам, подобным (24). Для входной цепи

$$f_{н1} = \frac{1}{2\pi C_б (R_с + r_{вх})},$$

где $C_б$ — емкость входного конденсатора; $R_с$ — сопротивление генератора; $r_{вх}$ — входное сопротивление каскада.

Сопрягающая частота для выходной цепи определяется емкостью $C_к$ и сопротивлениями нагрузки. Влияние выходного сопротивления транзистора можно не учитывать, так как оно всегда много больше $R_к$ и $R_н$ и включено параллельно им. Для выходной цепи

$$f_{н2} = \frac{1}{2\pi C_н (R_н + R_к)}.$$

Как следует из формул, обе частоты не связаны между собой и могут иметь произвольные значения. Каждая из них может быть и выше и ниже другой в зависимости от величин сопротивлений и емкостей. Частоты могут и совпадать, тогда точки излома совпадут. В этом случае наклон участка будет равен 40 дБ/дек, а расхождения между ЛАХ и реальной характеристикой на частоте среза составят 6 дБ.

На среднечастотном участке влияние $C_б$ и $C_н$ можно не учитывать и характеристика изображается горизонтальным отрезком на высоте $20 \lg K_{г}$ (коэффициент усиления на средних частотах).

Для высших частот сопрягающая частота может быть найдена по формуле

$$f_в = \frac{1}{2\pi \left(\frac{1}{f_\beta} + \beta C_к R_{к\,н} \right)},$$

где f_β — граничная частота транзистора, обусловленная инерционностью движения носителей тока; β — коэффициент усиления транзистора по току; $C_к$ — емкость коллекторного перехода; $R_{к.н}$ — результирующее сопротивление от параллельного включения $R_к$ и $R_н$. Какая из составляющих в скобках будет преобладать — зависит от параметров транзистора и нагрузочных сопротивлений.

ПРЕДСТАВЛЕНИЕ ИМЕНОВАННЫХ ЧИСЕЛ В ДЕЦИБЕЛАХ

До сих пор полагали, что и делимое, и делитель под знаком логарифма могут иметь произвольную величину и для выполнения децибельного пересчета важно знать только их отношение, независимо от абсолютных значений. Децибелы, определенные подобным образом, применяются для характеристики безразмерных параметров, которые выражаются отвлеченными числами и находятся через отношения мощностей (напряжений, токов), но не зависят от них.

В децибелах можно выражать также конкретные значения мощностей, а также напряжений и токов. Когда величина одного из членов, стоящих под знаком логарифма в выражениях (2), (8), (9), задана, второй член отношения и число децибел будут однозначно определять друг друга. Значит, если задаться какой-то неизменной мощностью (напряжением, током) в качестве условного уровня сравнения, то любой другой мощности (напряжению, току), сопоставляемой с ней, будет соответствовать совершенно определенное число децибел. Нулю децибел в этом случае отвечает мощность, равная мощности условного уровня сравнения, так как при $P_2=P_1$ $D_p=0$, поэтому этот уровень часто называют нулевым. Очевидно, что при разных нулевых уровнях одна и та же конкретная мощность (напряжение, ток) будут выражаться разными числами децибел.

Условный уровень мощности, с которым производится сравнение, в принципе может быть любым, однако не каждый был бы удобен для практического использования. Международным соглашением нулевым уровнем мощности определена мощность в 1 мВт на сопротивлении 600 Ом. Выбор этих параметров произошел исторически: первоначально децибел как единица измерения появился в технике телефонной связи. Волновое сопротивление открытых двухпроводных линий близко к величине 600 Ом, а мощность в 1 мВт, подводимая к телефонному капсюлю, обеспечивает, с одной стороны удовлетворительную слышимость, а с другой — малый уровень взаимных наводок с соседней телефонной парой.

Если в выражение (2) подставить конкретное значение для нулевого уровня, получится формула для пересчета мощности в децибелы:

$$D_{p0}=10\lg\frac{P}{P_0}, \qquad (25)$$

где P — мощность, подлежащая преобразованию в децибелы, а P_0 — нулевой уровень мощности. Величина P_0 ставится в знаменателе, при этом положительными децибелами выражаются мощности $P>P_0$.

Для случая, когда $P_0=1$ мВт$=10^{-3}$ Вт,

$$D_{p0}=10\lg\frac{P}{10^{-3}}=10\lg P\cdot10^{3}=10\lg P+30\lg10=10\lg P+30. \qquad (26)$$

Пользуясь последней формулой, легко найти, что мощность 1 Вт определяется как 30 дБ, 1 кВт как 60 дБ, а 1 МВт — это 90 дБ, т. е. практически все мощности, с которыми приходится встречаться, укладываются в пределах первой сотни децибел. Мощ-

ности, меньшие 1 мВт, будут выражаться отрицательными числами децибел.

В зарубежной литературе для децибел, определенных относительно уровня 1 мВт, иногда применяют обозначение dBm.

Подобным образом можно представить формулы для выражения в децибелах напряжений и токов:

$$D_{u0} = 20 \lg \frac{U}{U_0}; \tag{27}$$

$$D_{i0} = 20 \lg \frac{I}{I_0}, \tag{28}$$

где U и I — напряжение или ток, подлежащие преобразованию, а U_0 и I_0 — соответственно нулевые уровни этих параметров. Так как нулевой стандартный уровень мощности 1 мВт определен также и сопротивлением нагрузки 600 Ом, на основе формул (4) и (5) легко подсчитать, какие напряжение и ток характеризуют эту мощность.

$$U_0 = \sqrt{1 \cdot 10^{-3} \cdot 600} = 0{,}775\ \text{В};$$

$$I_0 = \sqrt{\frac{1 \cdot 10^{-3}}{600}} = 1{,}29 \cdot 10^{-3}\ \text{А} = 1{,}29\ \text{мА}.$$

Полагая эти значения нулевыми уровнями напряжения и тока, получаем:

$$D_{u0} = 20 \lg \frac{U}{0{,}775}; \tag{29}$$

$$D_{i0} = 20 \lg \frac{I}{1{,}29 \cdot 10^{-3}}; \tag{30}$$

здесь напряжение в вольтах, а ток в амперах.

Тот факт, что децибелы представляемого параметра отсчитываются относительно определенного уровня, часто подчеркивают термином «уровень»: уровень помех, уровень чувствительности, уровень громкости.

Перевод децибел в ватты, вольты и миллиамперы при стандартных нулевых уровнях облегчается Приложением 3. Порядок пользования таблицей понятен без пояснений. Если надо преобразовать числа, которые выходят за рамки таблицы, следует поступить так же, как было указано на стр. 10 и 11 в рекомендациях по расширению пределов преобразования для таблиц. Приложения 1 и 2. Приложение 3 при пересчетах следует использовать для преобразования только одного члена, для отыскания остальных надо пользоваться Приложением 1 либо 2.

Как пример, найдем эквивалентные напряжения и мощность для 48 дБ. Сначала для напряжения: 48 дБ=20+20+8. Из Приложения 3 находим, что 8 дБ ~ 1,95 В, а из приложения 1 20 дБ ~ 10, следовательно,

$$20+20+8\ \text{дБ} \sim 10 \cdot 10 \cdot 1{,}95\ \text{В} = 195\ \text{В}.$$

Для мощности: 48 дБ=10+10+10+10+8 дБ. Действуя, как и раньше, находим, что 48 дБ ~ 10 · 10 · 10 · 10 · 0,00631 Вт=63,1 Вт.

Попробуйте решить этот пример по-другому: в напряжение и мощность преобразовывать не 8 дБ, а другой член суммы, или разбивая 48 дБ на иные составляющие. Окончательный результат должен быть таким же.

Для закрепления навыков работы с таблицей рекомендуем пересчитать в децибелы мощность Братской ГЭС: $P=4{,}5\cdot10^9$ кВт. *Ответ*: 122,8 дБ.

Интересно отметить, что если эту величину округлить до целого числа децибел, то 0,2 дБ округления, которым соответствует 4,7% относительной погрешности (см. табл. 2) составят $212\cdot10^6$ кВт абсолютной мощности. Пример этот показывает, насколько внимательно надо относиться к округлениям децибел, особенно при больших уровнях сигналов.

Чувствительность микрофонов, т. е. отношение выходного электрического сигнала на нагрузке к величине звукового давления, действующего на диафрагму, часто выражают в децибелах, сравнивая мощность, развиваемую микрофоном на номинальном нагрузочном сопротивлении, со стандартным нулевым уровнем мощности $P_0=1$ мВт. Типовыми условиями испытания принято считать звуковое давление 1 Н/м² частотой 1 кГц, нагрузочное сопротивление для динамического микрофона 250 Ом. Этот параметр микрофона носит название стандартного уровня чувствительности микрофона и определяется как

$$N_{\text{ст}} = 10\lg\frac{P_{\text{н}}}{P_0} = 10\lg\frac{U_{\text{н}}^2}{R_{\text{ном}}\cdot10^{-3}} = 20\lg\frac{U_{\text{н}}}{\sqrt{R_{\text{ном}}\cdot10^{-3}}};$$

здесь $P_{\text{н}}$ — мощность, рассеиваемая на нагрузке, Вт; $U_{\text{н}}$ — напряжение на номинальной нагрузке в В; $R_{\text{ном}}$ — сопротивление номинальной нагрузки, Ом.

Мощность, развиваемая микрофоном, естественно, чрезвычайно мала, и уровень чувствительности микрофона поэтому выражается отрицательными децибелами. Например, для распространенного микрофона типа МД-64 $N_0=-74$ дБ. Зная уровень передачи микрофона (он приводится в паспортных данных), можно вычислить величину его чувствительности в единицах напряжения.

Определим в виде примера чувствительность в милливольтах упомянутого микрофона МД-64. Расчет ведется в два этапа. Сначала находится мощность, соответствующая заданному уровню передачи. В Приложении 3 величины —74 дБ нет и поэтому представляем ее как сумму: -74 дБ $=(-10)+(-10)+(-10)+(-10)+(-10)+(-10)+(-14)$ дБ. По таблице находим, что -14 дБ $\sim0{,}0398$ мВт $\approx$ $\approx0{,}04$ мВт, из приложения 2 известно, что -10 дБ $\sim0{,}1$. Следовательно, $N_0=-14+(-10)+(-10)+(-10)+(-10)+(-10)+(-10)=$ $=-74$ дБ·

$$P_{\text{вых}}=0{,}04\ \text{мВт}\cdot0{,}1\cdot0{,}1\cdot0{,}1\cdot0{,}1\cdot0{,}1\cdot0{,}1=$$

$$=4\cdot10^{-8}\text{мВт}=4\cdot11^{-11}\ \text{Вт}.$$

Зная выходную мощность и сопротивление нагрузки (250 Ом), легко рассчитать и выходное напряжение:

$$U_{\text{вых}}=\sqrt{4\cdot10^{-11}\cdot250}=10^{-4}\,\text{В}=0{,}1\text{мВ}.$$

Это напряжение соответствует звуковому давлению 10^5 Н/м², а при звуковом давлении 1 Н/м² выходное напряжение составит $\frac{0{,}1\text{мВ}}{10^5\,\text{Н/м}^2}=10^6$ мВм²/Н.

Иногда в переводной литературе можно встретить и другие уровни мощности, используемые в качестве нулевых, а именно 6 и 12,5 мВт на сопротивлении 500 Ом, а также 1 Вт.

В усилительной технике сопротивления нагрузки, помимо 600 Ом, могут быть 200, 150, 50, 5 Ом. В телевизионной технике и устройствах УВЧ часто применяется сопротивление нагрузки, равное 75 Ом.

Возможность представления в децибелах как отвлеченных, так и именованных чисел приводит к тому, что одно и то же устройство может характеризоваться разными числами децибел. В начале книги, как пример на нахождение децибел, мы определили, что транзисторный усилитель с $P_{\text{вх}}=1{,}5$ мВт и $P_{\text{вых}}=150$ мВт имеет коэффициент усиления по мощности $K_{\text{дБ}}=20$ дБ. Выходной же уровень мощности этого усилителя сравнительно со стандартным уровнем 1 мВт составит:

$$P_{0\,\text{дБ}} = 10\lg\frac{P_{\text{вых}}}{P_0} = 10\lg\frac{150\cdot 10^{-3}}{1\cdot 10^{-3}} = 21{,}75 \approx 22\,\text{дБ}.$$

Эту двойственность децибел надо иметь в виду. Защитой от ошибок тут может служить ясное понимание природы определяемого параметра.

ШКАЛЫ ДЕЦИБЕЛ ВОЛЬТМЕТРОВ

Большинство современных стрелочных вольтметров, как автономных, так и вмонтированных в другие приборы (генераторы сигналов, измерители нелинейных искажений, анализаторы частот и другие), помимо обычных шкал имеют также и шкалу децибел. Эта шкала обозначается знаком dB или DB и отличается четко выраженной неравномерностью — в начале она сжата, а к концу сильно растянута. Пользуясь шкалой децибел, можно получать результаты измерений сразу в децибелах, не прибегая к отсчетам в вольтах.

Чаще всего у этих приборов нуль шкалы децибела соответствует входному напряжению 0,775 В (1 мВт на 600 Ом), хотя известны приборы, калиброванные по другим начальным уровням. Естественно, что отсчет децибел можно производить на любом сопротивлении, а не только на сопротивлении 600 Ом. Напряжения, которые больше условного нулевого уровня, характеризуются положительными децибелами, меньше этого уровня — отрицательными.

Внешний вид стрелочного измерителя и переключателя пределов измерений в двух наиболее распространенных вариантах исполнения шкал децибел показаны на рис. 9,*а*, *б*. Две верхние шкалы приборов служат для измерения напряжений, нижняя шкала — для отсчета децибел. Шкала децибел короче остальных шкал и начинается она на некотором расстоянии от нулевой риски напряжения, так как нулю вольт соответствует —∞дБ. На переключателе верхние числа определяют пределы измеряемого напряжения, нижние — относятся к децибелам. Каждый поддиапазон измерения отличается по уровню от соседнего на 10 дБ, что соответствует кратности по напряжению 3,16 раз.

Варианты исполнения децибельных шкал различаются положением точки 0 дБ ~ 0,775 В. В первом варианте отметка 0 дБ совпадает с отметкой 0,775 В на шкале с пределом измерения 1 В, во

втором — на шкале с пределом 3 В. Оба вида исполнения шкал равноценны и обеспечивают одинаковые результаты измерений.

Показания, снятые со шкалы децибел, алгебраически складываются с показаниями на переключателе пределов измерения, а не перемножаются, как в случае отсчета напряжений. Если, к примеру, ручка переключателя установлена на —20 дБ, а стрелка прибора находится у отметки —1,5 дБ, то суммарный уровень составит —20 + (—1,5) = —21,5 дБ. При том же положении переключателя, но расположении стрелки у отметки +1,5 дБ общий уровень будет —20 + (+1,5) = —18,5 дБ.

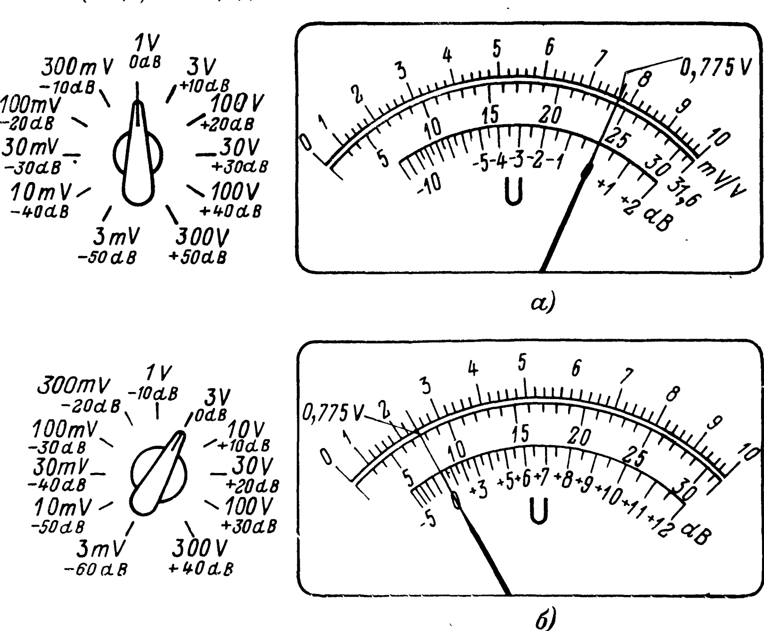


Рис. 9. Вид стрелочных измерителей и переключателей пределов измерений вольтметров со шкалой децибел.

Правила выполнения отсчетов по шкале децибел рассмотрим на примере измерения отношения сигнал — шум усилительного устройства, о котором известно, что его номинальная выходная мощность равна 1 Вт на сопротивлении 12 Ом. Этой мощности соответствует

$$U_{вых} = \sqrt{1 \cdot 12} = 3{,}46 \text{ В}.$$

На вход усилительного устройства подается сигнал такой величины, чтобы на выходе установилось напряжение 3,46 В. По шкале децибел определяется, что напряжению 3,46 В соответствует уровень +13 дБ = (+20—7 дБ) (рис. 10,*а*).

Уровень собственных шумов измеряется прямо в децибелах после отключения входного сигнала, как показано на рис. 10,*б*. Он

равен —22 дБ=[—20+(—2)]. Отношение сигнал — шум в децибелах будет определяться как разность между уровнем полезного сигнала и уровнем шума $F_{сш}=+13-(-22)=+35$ дБ. Так называемый уровень помех представляет величину, обратную отношению сигнал — шум, т. е. определяется как разность между вторым и первым отсчетами —22—(+13)=—35 дБ.

Имея небольшой опыт работы со шкалой децибел, разность двух уровней в децибелах можно не вычислять, а определять непосредственно в ходе измерения. В последнем примере, чтобы перейти от уровня сигнала +13 дБ к уровню шума —22 дБ, ручка переключателя переводилась 4 раза влево, что соответствует —10+(—10)+ +(—10)+(—10)=—40 дБ, а показания стрелочного индикатора из-

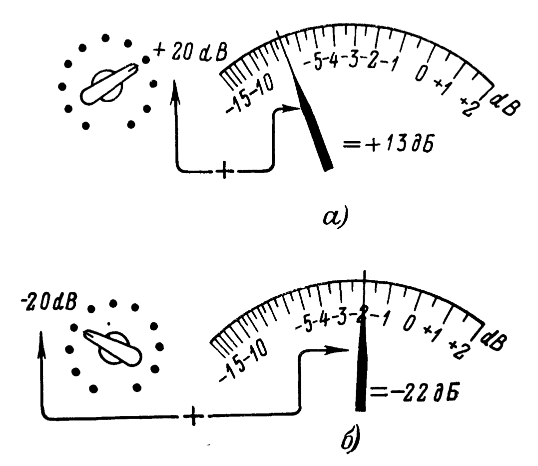


Рис. 10. Выполнение отсчетов по шкале децибел (к примеру определения отношения сигнал—шум).

менились на +5 дБ (стрелка переместилась вправо с отметки —7 дБ на шкале к отметке —2 дБ). Искомая величина равна алгебраической сумме показаний по переключателю и по шкале стрелочного индикатора, т. е. —40+(+5)=—35 дБ.

Отечественный ламповый милливольтметр типа В3-6 отличается от рассмотренных приборов тем, что нуль децибел соответствует уроню 1 В, а также наличием двух переключателей пределов измерения. На верхнем переключателе пределы измерения напряжения соседних поддиапазонов различаются в 2 или 2,5 раза, что соответствует изменению уровней на 6 или 8 дБ, нижним переключателем чувствительность по напряжению изменяется в 1 000 раз (60 дБ).

При выполнении децибельных отсчетов показания по шкале стрелочного измерителя алгебраически складываются с показаниями обоих переключателей. На рис. 11 представлен внешний вид стрелочного индикатора и переключателей пределов измерения. Положению стрелки и переключателей отвечает уровень +14+(—60)+ +(+3,5) дБ=—42,5 дБ.

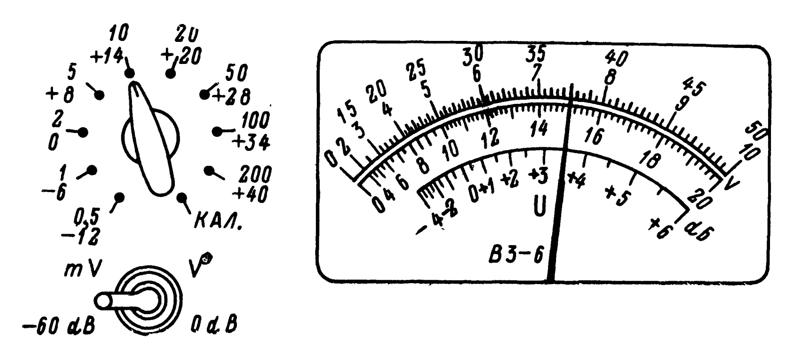


Рис. 11. Вид стрелочного измерителя и переключателей пределов измерений лампового милливольтметра В3-6.

Необходимо отметить, что хотя численная величина каждого отсчета по этому вольтметру будет отличаться от общепринятого, разность двух уровней напряжения в децибелах (для чего, собственно, и применяется шкала децибел) будет такой же, как и при пользовании иным прибором, так как нулевой уровень не входит в окончательный результат. Действительно,

$$D_u = 20\lg\frac{U_2}{U_0} - 20\lg\frac{U_1}{U_0} = 20\lg\left(\frac{U_2}{U_0}:\frac{U_1}{U_0}\right) = 20\lg\frac{U_2}{U_1}.$$

Если вернуться к рассмотренному выше примеру с измерением отношения сигнал — шум и предположить, что отсчеты выполнялись по децибельной шкале прибора В3-6, что для полезного сигнала (3,46 В) уровень в децибелах будет составлять:

$$D_{uc} = 20\lg\frac{3{,}46\text{В}}{1\text{В}} = 20\cdot 0{,}539 = 10{,}78 \approx 10{,}8\text{ дБ},$$

а для шумов (61,5 мВ)

$$D_{uш} = 20\lg\frac{61{,}5\cdot 10^{-3}\text{ В}}{1\text{В}} = 20\lg 61{,}5 - 60 =$$

$$= 20\cdot 10{,}789 - 60 = -24{,}2\text{ дБ}.$$

Отношение сигнал — шум составит, таким образом,

$$+10{,}8 - (-24{,}2) = +35\text{ дБ},$$

т. е. ту же величину, что и при первом измерении.

НЕПЕРЫ

В технике проводной связи и проводного вещания, а в ряде европейских стран и в радиоэлектронной технике, применяется другая логарифмическая единица — непер — русское обозначение Нп, Неп; международное Np, Nep. Для этой единицы, в отличие от децибел, исходным параметром служит отношение напряжений или

токов, а не мощностей. Для определения числа непер используются натуральные логарифмы (логарифмы с основанием $e=2,718...$).

Если имеются два напряжения U_2 и U_1 или два тока I_2, I_1, то их отношение, выраженное в неперах, находится по формулам:

$$N_u = \ln\frac{U_2}{U_1}, \qquad (31)$$

$$N_I = \ln\frac{I_2}{I_1}. \qquad (32)$$

Как и для случая расчета децибел по отношениям напряжения либо тока по формулам (8) и (9), предполагается равенство сопротивлений нагрузки.

Одному неперу соответствует случай, когда два напряжения или тока отличаются в 2,718 раз, так как $\ln 2,718=\ln e=1$. Если задано отношение мощностей P_2/P_1, то

$$N_p = \ln\frac{\sqrt{P_2}}{\sqrt{P_1}} = \frac{1}{2}\ln\frac{P_2}{P_1}, \qquad (33)$$

поскольку

$$\frac{U_2}{U_1} = \frac{\sqrt{P_2}}{\sqrt{P_1}}.$$

Как и для случая децибел нетрудно вычислить, каким отношениям напряжений соответствуют целые значения непер:

1Нп $\sim 2,718^1 = 2,718$,	6Нп $\sim 2,718^6 = 40,4$,
2Нп $\sim 2,718^2 = 7,389$,	7Нп $\sim 2,718^7 = 1\,097$,
3Нп $\sim 2,718^3 = 20,09$,	8Нп $\sim 2,718^8 = 2\,981$,
4Нп $\sim 2,718^4 = 54,60$,	9Нп $\sim 2,718^9 = 8\,103$,
5Нп $\sim 2,718^5 = 148,4$,	10Нп $\sim 2,718^{10} = 22\,026$.

Отрицательные неперы находятся сходным образом:

—1 Нп $\sim 1/2,7183=2,7183^{-1}=0,3679$; —2Нп $\sim 2,7183^{-2}=0,3679^2=0,1353$.

— 3Нп $\sim 0,3679^3 = 4,98\cdot10^{-2}$,	— 7Нп $\sim 0,3679^7 = 9,12\cdot10^{-4}$,
— 4Нп $\sim 0,3679^4 = 1,832\cdot10^{-2}$,	— 8Нп $\sim 0,3679^8 = 3,35\cdot10^{-4}$,
— 5Нп $\sim 0,3679^5 = 6,74\cdot10^{-3}$,	— 9Нп $\sim 0,3679^9 = 1,23\cdot10^{-4}$,
— 6Нп $\sim 0,3679^6 = 2,48\cdot10^{-3}$,	—10Нп $\sim 0,3679^{10} = 4,5\cdot10^{-5}$.

Подробная таблица для перевода в неперы отношений напряжений (токов) и мощностей приведена в Приложении 4.

Правила действий с неперами те же, что и с децибелами — сумма двух чисел в неперах эквивалентна произведению двух соответствующих отношений напряжений (токов) или мощностей. Обратные значения этих отношений характеризуются отрицательными числами непер.

В неперах, как и в децибелах, можно выражать и абсолютные значения мощностей, напряжений и токов. За условный нулевой уровень, как и для децибел, обычно принимается 1 мВт на сопротивлении 600 Ом (реже—150 Ом), чему соответствует напряжение 0,775 В и ток 1,29 мА. Для представления напряжений, токов и мощностей в неперах можно пользоваться следующими формулами:

$$N_u = \ln\frac{U}{0,775}; \qquad (34)$$

$$N_i = \ln \frac{I}{1,29\cdot 10^{-3}};\qquad (35)$$

$$N_p = \frac{1}{2} \ln \frac{P}{10^{-3}} = \frac{1}{2} \ln \frac{P}{10^{-3}}.\qquad (36)$$

Напряжение здесь должно быть в вольтах, ток — в амперах, мощность — в ваттах.

Иногда требуется пересчитать в децибелы известное число непер или, наоборот, выразить в неперах заданное число децибел. Зависимость между этими двумя единицами можно вывести на основе соотношений, известных из теории логарифмов. Между натуральным логарифмом любого положительного числа и десятичным логарифмом того же числа существует следующая зависимость:

$$\lg x = M \ln x \approx 0{,}434 \ln x,$$

так как M — модуль перевода натуральных логарифмов в десятичные

$$M = \lg e = \frac{1}{\ln 10} \approx 0{,}4343.$$

В нашем случае

$$x = \frac{P_2}{P_1}, \text{ а } \lg \frac{P_2}{P_1} = 0{,}4343 \ln x,\qquad (37)$$

так как

$$D_p = 10 \lg \frac{P_2}{P_1} \text{ и } N_p = \frac{1}{2} \ln \frac{P_2}{P_1}, \text{ то } \lg \frac{P_2}{P_1} = \frac{D_p}{10} \text{ и } \ln \frac{P_2}{P_1} = 2N_p.$$

Если подставить два последних выражения в формулу (37), получится

$$N_p = 8{,}686 D_p;\qquad (38)$$

$$D_p = 0{,}115 N_p.\qquad (39)$$

Рекомендуем проделать те же преобразования для отношения напряжений, т. е.

$$D_u = 20 \lg \frac{U_2}{U_1} \text{ и } N_u = \ln \frac{U_2}{U_1},$$

и убедиться, что в итоге получается тот же результат.

В некоторых случаях, как, например, в ГОСТ 11515-65 «Тракты радиовещательные», количественные показатели приводятся как в децибелах, так и в неперах.

ДЕЦИБЕЛЫ В АКУСТИКЕ

До сих пор, говоря о децибелах, мы оперировали электрическими терминами — мощностью, напряжением, током, сопротивлением. Между тем логарифмические единицы используются и в других областях науки и техники. Особенно широко применяются децибелы в акустике, где они являются наиболее часто применяемой единицей при количественных оценках звука.

Звук, как физическое явление, представляет распространяющееся механическое колебательное движение частиц упругой сре-

ды — газа, жидкости, твердого тела — с малыми амплитудами. Источником звука служит вибрирующее тело. Его колебания передаются ближайшим частицам среды, а от них — все более отдаленным. Каждая частица совершает колебания относительно равновесного состояния, в котором она находилась до возбуждения.

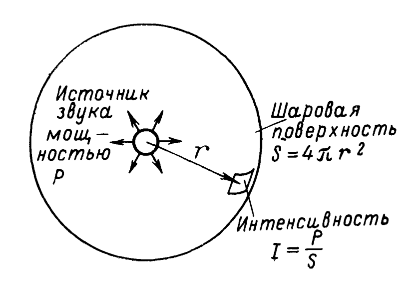


Рис. 12. Связь между звуковой мощностью и интенсивностью звука.

Скорость, с которой происходит передача энергии от частицы к частице, определяет скорость распространения звуковой волны или, другими словами, скорость звука.

Колебания частиц среды условно называются звуковыми волнами, хотя наше ухо воспринимает их как звук, только когда частота колебаний находится в диапазоне 16—20 000 Гц. Колебания, частоты которых ниже 16 Гц, называются инфразвуковыми, высокочастотные колебания — ультразвуковыми.

Звуковые волны являются носителями звуковой энергии. Общее количество энергии, которое источник звука излучает в окружающее пространство за единицу времени, характеризует звуковую мощность источника. Звуковую мощность обычно определяют в ваттах. Некоторые конкретные источники звука можно характеризовать следующими приблизительными цифрами: шепот — 10^{-9} Вт, разговор —10^{-5} Вт, крик —10^{-3} Вт, большой оркестр —10 Вт, большой турбореактивный самолет — 10^5 Вт.

Следует отметить, что для электроакустического преобразователя излучаемая акустическая мощность меньше подводимой электрической мощности. Коэффициент полезного действия громкоговорителя динамического типа невелик и составляет несколько процентов.

В большинстве случаев, однако, для потребителя практический интерес представляет не общая акустическая мощность, излучаемая во все стороны, а лишь та, которая достигает приемник звука — барабанную перепонку уха, диафрагму микрофона и т. п. Часть общей мощности, приходящаяся на единицу площади, называется интенсивностью (силой) звука. В каждой точке сферической поверхности, отдаленной от источника звука, излучающего энергию равномерно во все стороны, на расстояние r (рис. 12), интенсивность звука одинакова. Таким образом, можно записать:

$$I=P/S, \qquad (40)$$

где I — интенсивность звука; P — общая мощность излучения источника, а $S=4\pi r^2$—площадь шаровой поверхности с радиусом r.

По мере отдаления от источника, с увеличением радиуса r увеличивается площадь сферы S, а значит, интенсивность звука уменьшается.

Непосредственное измерение интенсивности звука связано с большими техническими трудностями, и в настоящее время нет приборов, позволяющих непосредственно определить этот параметр.

С помощью акустических приборов можно сравнительно просто измерить эффективное звуковое давление и колебательную скорость частиц среды, величины которых находятся в прямой зависимости от интенсивности звука. Звуковое давление p представляет избыточное колебательное давление в среде по отношению к давлению, существующему там до появления звуковых волн (единица измерения Н/м^2). Колебательной скоростью v называют мгновенную скорость колебательного движения частиц среды относительно равновесного положения (единица измерения м/с). Эта скорость зависит от частоты колебаний и величины звукового давления. Колебательная скорость частиц и скорость распространения звука C имеют одинаковую размерность, но представляют разные понятия, и их не следует путать.

Примером приемников звукового давления может служить большинство типов современных микрофонов, которые преобразуют это давление в пропорциональные электрические сигналы. Конструкция некоторых микрофонов позволяет получать напряжения, пропорциональные колебательной скорости.

Интенсивность звука I связана со звуковым давлением и колебательной скоростью простой зависимостью

$$I = pv. \tag{41}$$

Если звуковая волна распространяется в свободном пространстве, где нет отражения звука, то

$$v = \frac{p}{\rho C}; \tag{42}$$

здесь ρ — плотность среды, кг/м^3; C — скорость звука в среде, м/с.

Произведение ρC характеризует среду, в которой происходит распространение звуковой энергии, и называется ее акустическим сопротивлением. Для воздуха при нормальном атмосферном давлении и температуре 20 °С $\rho C = 420$ Н/м$^2 \cdot$ с.

Если из формулы (42) в формулу (41) подставить значение колебательной скорости, то после преобразования окажется, что

$$I = \frac{p^2}{\rho C}. \tag{43}$$

Таблица 4

Электрическая мощность P	Напряжение U	Электрический ток I	Электрическое сопротивление R	$I = \frac{U}{R}$	$P = UI$	$P = \frac{U^2}{R}$	$P = I^2R$
Акустическая мощность P. Интенсивность звука I	Звуковое давление P	Колебательная скорость v	Акустическое сопротивление ρC	$v = \frac{p}{\rho C}$	$I = pv$	$I = \frac{p^2}{\rho C}$	$I = v^2 \rho C$

В табл. 4 приведена аналогия между отдельными понятиями, характеризующими электрические и акустические явления, и уравнениями, описывающими количественные зависимости между ними.

Интенсивность звука является аналогом электрической мощности, звуковое давление — аналогом напряжения, колебательная скорость — аналогом тока, а акустическое сопротивление соответствует электрическому сопротивлению. По аналогии с законом Ома для электрической цепи можно говорить об акустическом законе Ома. Следовательно, все, что говорилось выше о преобразовании в децибелы электрических величин, в равной мере относится и к акустическим явлениям.

Применение децибел в акустике создает ряд удобств. Интенсивности звуков, с которыми приходится иметь дело в современных условиях, могут различаться в сотни миллионов раз — от тихого шепота до рева ракетных двигателей. Такой огромный диапазон изменений акустических величин создает большие неудобства при сопоставлении их абсолютных значений. Использование логарифмических единиц оказывается очень удобным, так как при этом существенно сужается диапазон численных величин. Второе, не менее важное обстоятельство, способствовавшее широкому применению децибел в акустике, объясняется замечательным свойством нашего уха воспринимать звуки, интенсивность которых различается в миллионы раз. Громкость звука при оценке ее на слух возрастает примерно пропорционально логарифму интенсивности или звукового давления. Таким образом, уровни этих величин, выраженные в децибелах, довольно близко соответствуют громкости, воспринимаемой ухом.

В акустике, по аналогии с электротехникой, определение децибел базируется на отношении двух мощностей:

$$L_P = 10\lg\frac{P_2}{P_1}, \tag{44}$$

где P_2 и P_1 — мощности двух произвольных источников звука. Подобным же образом в децибелах выражается отношение двух интенсивностей звука:

$$L_I = 10\lg\frac{I_2}{I_1}. \tag{45}$$

Если в последнее уравнение подставить значения интенсивностей, выраженные через звуковое давление [формула (43)], то

$$L_I = 10\lg\left(\frac{p_2^2}{\rho C}:\frac{p_1^2}{\rho C}\right) = 10\lg\frac{p_2^2}{p_1^2} = 20\lg\frac{p_2}{p_1}. \tag{46}$$

К последнему уравнению относится та же оговорка, что и к уравнению (8) для вычисления децибел по отношению двух напряжений: при обоих измерениях должно быть обеспечено равенство акустических сопротивлений, другими словами, — постоянство физических параметров среды, в которой распространяются звуковые волны.

Децибелы, определенные по формулам (44), (45), (46), не связаны с абсолютными значениями акустических величин и применяются для оценки эффективности средств звуковой изоляции и си-

стем подавления и заглушения шумов. Подобным образом выражаются и неравномерности частотных характеристик, т. е. разность максимального и минимального значений в заданном диапазоне частот различных излучателей и приемников звука: громкоговорителей, микрофонов и проч. Отсчет при этом обычно ведется от среднего значения рассматриваемой величины либо — при работе в звуковом диапазоне — относительно значения при частоте 1 кГц.

В практике акустических измерений, однако, как правило, приходится иметь дело со звуками, величины которых должны быть выражены конкретными цифрами. Аппаратура для проведения акустических измерений сложнее аппаратуры для электрических измерений, а по точности существенно уступает ей. Особенно сложны так называемые абсолютные измерения, в ходе которых требуется непосредственное определение абсолютных звуковых параметров — интенсивности (Вт/м^2), звукового давления (Н/м^2), колебательной скорости (м/с). С целью упрощения техники измерений и снижения погрешности в акустике отдается предпочтение измерениям относительно эталонных, калиброванных уровней, величины которых известны. С этой же целью для измерения и исследования акустических сигналов их преобразуют в электрические сигналы.

Абсолютные значения мощностей, интенсивностей звуков и звуковых давлений также могут быть выражены в децибелах, если в формулах (44)—(46) задаваться значениями одного из членов под знаком логарифма. Международным соглашением уровнем отсчета интенсивности звука (нулевым уровнем) принято считать 10^{-12} Вт/м^2. Эта ничтожная мощность, под действием которой амплитуда колебаний барабанной перепонки меньше размеров атома, примерно соответствует порогу слышимости нормального уха в области частот наибольшей чувствительности слуха. Совершенно ясно, что все слышимые звуки выражаются относительно этого уровня только положительными децибелами.

Для представления интенсивности звука в децибелах относительно заданного уровня формула (45) примет вид:

$$L_{I0} = 10 \lg \frac{I}{I_0}. \qquad (47)$$

Значение интенсивности, вычисленное по этой формуле, принято называть уровнем интенсивности звука.

Подобным образом можно выразить и уровень звукового давления

$$L_{p0} = 20 \lg \frac{p}{p_0}. \qquad (48)$$

Чтобы уровни интенсивности звука и звукового давления в децибелах численно выражались одной величиной, в качестве нулевого уровня звукового давления (порога звукового давления) принято значение

$$p_0 = 2 \cdot 10^{-5} \text{ Н/м}^2.$$

Определим в виде примера, какой уровень интенсивности в децибелах создает оркестр со звуковой мощностью 10 Вт на расстоя-

нии $r=15$ м. Интенсивность звука на расстоянии $r=15$ м от источника составит:

$$I=\frac{P}{S}=\frac{10}{4\pi 15^2}=\frac{10}{2835}=3{,}53\cdot 10^{-3}\ \text{Вт/м}^2.$$

Уровень интенсивности в децибелах

$$I_I=10\lg\frac{I}{I_0}=10\lg\frac{3{,}53\cdot 10^{-3}}{10^{-12}}=$$

$$=10\lg 3{,}53\cdot 10^{9}\sim 5{,}44+90\approx 95\ \text{дБ}.$$

Тот же результат будет получен, если преобразовать в децибелы не уровень интенсивности, а уровень звукового давления. Действительно, из формулы (43)

$$p=\sqrt{I\rho C},\quad p=\sqrt{3{,}53\cdot 10^{-3}\cdot 420}=1{,}2\ \text{Н/м}^2;$$

$$L_p=20\lg\frac{p}{p_0}=20\lg\frac{1{,}2}{2\cdot 10^{-5}}=20\lg 0{,}6\cdot 10^{5}=$$

$$=-4{,}45+100\approx 95\ \text{дБ}.$$

Так как в месте приема звука уровень интенсивности звука и уровень звукового давления выражаются одинаковым числом децибел, на практике часто применяется термин «уровень в децибелах» без указания, к какому именно параметру эти децибелы относятся.

Если на приемник звука одновременно воздействуют два или несколько источников звука и известна интенсивность звука в децибелах, создаваемая каждым из них, то для определения результирующей величины децибелы следует обратить в абсолютные значения интенсивностей (Вт/м^2), сложить их, и эту сумму снова преобразовать в децибелы. Складывать сразу децибелы в этом случае нельзя, так как это соответствовало бы произведению абсолютных значений интенсивностей. Допустим, что интенсивность звука, создаваемая каждым из двух источников, равна 60 дБ, г. е. $L_{I1}=L_{I2}=60$ дБ. При действии обоих источников интенсивность возрастет вдвое, т. е. увеличится на 3 дБ и составит 63 дБ, но не 120 дБ.

Если уровень интенсивности одного источника звука превышает уровни остальных на 8—10 дБ и более, можно учитывать только один этот источник, а действием остальных пренебречь.

Помимо рассмотренных акустических уровней иногда можно встретить и понятие уровня звуковой мощности источника звука, определяемого по формуле

$$L_P=10\lg\frac{P}{P_0},\tag{49}$$

где P — звуковая мощность характеризуемого произвольного источника звука, Вт; P_0 — начальное (пороговое) значение звуковой мощности, величина которого берется обычно равной $P_0=10^{-13}$ Вт,

УРОВНИ ГРОМКОСТИ

Звуковое давление, меняющееся во времени по синусоидальному закону, человеческое ухо воспринимает как звук чистого тона. Более сложные периодические звуковые колебания воспринимаются на слух музыкальными тонами. Когда количество составляющих звука велико, а их частоты и амплитуды не связаны определенной зависимостью, ухо воспринимает такой звук как шум. Большинство звуков, которые нам приходится слышать в повседневной жизни, имеют шумовой характер.

Чувствительность уха к звукам разных частот различна. Зависимость эта довольно сложна. При необольших уровнях интенсивности звука (примерно до 70 дБ) максимальная чувствительность находится в области 2—5 кГц и убывает с повышением и понижением частоты. Поэтому тоны одинаковой интенсивности, но разных частот будут казаться на слух разными по громкости. С ростом силы звука частотная характеристика уха выравнивается и при больших уровнях интенсивности (80 дБ и выше) ухо реагирует приблизительно одинаково на звуки разных частот звукового диапазона. Из этого следует, что интенсивность звука, которая измеряется специальными широкополосными приборами, и громкость, которая фиксируется ухом, — понятия не равнозначные.

С этой особенностью слуха в акустике приходится постоянно считаться, и поэтому было введено специальное понятие — уровень громкости, которое определяет уровень интенсивности звука с учетом частотных и динамических свойств уха.

Уровень громкости любого звука характеризуется величиной уровня равного по громкости звука, частотой 1 кГц. Уровни громкости характеризуются так называемыми кривыми равных громкостей, каждая из которых показывает, какой уровень интенсивности на разных частотах должен развить источник звука, чтобы создать впечатление равной громкости с тоном 1 кГц заданной интенсивности (рис. 13). Эти кривые построены по итогам обследования сотен людей, т. е. относятся к так называемому «среднему уху». Как показывает опыт, слух всех людей следует в общем этим характеристикам, хотя индивидуальные отличия на некоторых частотах могут достигать 20 дБ.

Кривые равной громкости представляют по существу семейство частотных характеристик уха в децибельном масштабе для разных уровней интенсивности. Отличие их от обычных амплитудно-частотных характеристик, например, изображенных на рис. 6, состоит лишь в способе построения: «завал» характеристики, т. е. снижение коэффициента передачи, здесь изображен повышением, а не понижением соответствующего участка кривой.

Единице, характеризующей уровень громкости, во избежание путаницы с децибелами интенсивности и звукового давления присвоено особое наименование — фон. Уровень громкости звука в фонах численно равен уровню звукового давления чистого тона частотой 1 кГц в децибелах, равного с ним по громкости без учета фактической интенсивности. Другими словами, один фон — это один децибел звукового давления тона частотой 1 кГц с поправкой на частотную характеристику уха. Между двумя этими единицами нет постоянного соотношения: оно меняется в зависимости от уровня громкости сигнала и его частоты. Только для тонов частоты 1 кГц численные значения для уровня громкости в фонах и уровня интенсивности в децибелах совпадают.

Если обратиться к рис. 13 и проследить ход одной из кривых, например, для уровня 60 фон, то нетрудно определить, что для обеспечения равной громкости с тоном 1 кГц на частоте 40 Гц требуется интенсивность звука 80 дБ, т. е. уровень мощности излучателя должен быть выше на 20 дБ.

В высококачественных усилителях звуковой частоты применяются ручные регуляторы громкости с тонкомпенсацией или, как их еще называют, компенсированные регуляторы. Такие регуляторы одновременно с регулировкой величины входного сигнала в сто-

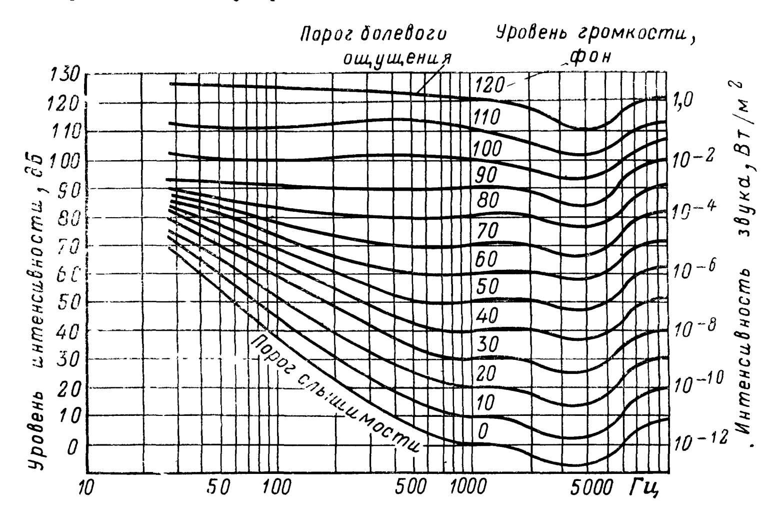


Рис. 13. Кривые равных громкостей.

рону уменьшения обеспечивают подъем частотной характеристики в области низших частот, благодаря чему для слуха создается неизменный тембр звучания при различных громкостях воспроизведения звука.

Оперируя с акустическими понятиями, следует иметь в виду, что интенсивность звука представляет объективное физическое явление, которое может быть точно определено и измерено. Оно реально существует независимо от того, слышит его кто-нибудь или нет. Громкость звука представляет эффект, который он производит на слушателя, и является поэтому чисто субъективным понятием, так как зависит от состояния органов слуха человека и его личных свойств к восприятию звука.

ШУМОМЕРЫ

Человек живет в среде, фактор шума которой играет не последнюю роль в его жизни. Исследованиями доказано, что под воздействием шума даже умеренной интенсивности ухудшается работоспособность, особенно при умственном труде. Отрицательное влияние шума тем сильнее, чем выше его тональность, длительность

воздействия и неоднородность спектрального состава за счет импульсных составляющих и отдельных включений чистого тона Музыка, если ее приходится слушать против желания, действует так же неблагоприятно, как и шум.

Длительное воздействие сильного шума с уровнем от 100 дБ и выше может вызвать у человека нарушения слуха, расстройство нервной системы и способствовать заболеваниям сердечно-сосудистой системы. Производства, уровень шума которых превышает допустимые нормы, отнесены к категории вредных. Поэтому борьба со всеми видами шумов — производственными, уличными и бытовыми — представляет одну из важнейших обязанностей органов санитарной инспекции и службы охраны труда на предприятиях.

Для измерения всевозможных шумовых характеристик применяются специальные приборы, называемые шумомерами. Шумомер представляет автономный переносный прибор, позволяющий измерять непосредственно в децибелах уровни звукового давления в широких пределах относительно стандартных уровней.

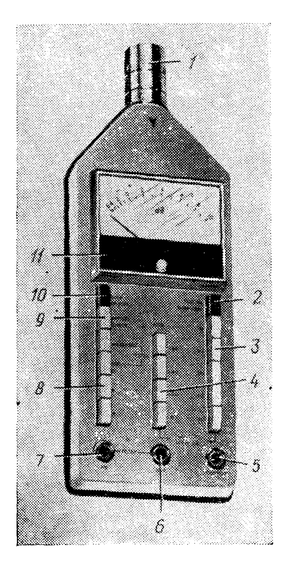


Рис. 14. Внешний вид современного шумомера (фирма Dawe Instruments Англия, тип 1400G).

1 — микрофон; *2* — переключатель «быстро—медленно», *3* — переключатель пределов основной; *4* — переключатель пределов добавочный, *5* — гнездо выхода усилителя; *6* — гнездо для подключения выхода фильтра; *7* — гнездо для подключения входа фильтра; *8* — переключатели частотных характеристик (*A*, *B*, *C*), *9* — контроль батарей; *10* — включение питания; *11* — стрелочный измеритель.

Шумомер состоит из высококачественного микрофона, широкополосного усилителя, переключателя чувствительности, меняющего усиление ступенями по 10 дБ, переключателя частотных характеристик и стрелочного индикатора, шкала которого градуирована непосредственно в децибелах.

Схемы современных шумомеров выполняются на транзисторах, габариты приборов не превышают размеров портативных приемников, что позволяет производить измерения и в труднодоступных местах. Внешний вид одного из таких приборов показан на рис. 14. На лицевой панели шумомеров помимо основных органов управления обычно имеются гнезда, позволяющие подключать к схеме различные дополнительные устройства: частотные и амплитудные анализаторы, самописцы, осциллографы и другие приборы. Шумомеры позволяют определять как общие уровни интенсивностей звука, при измерениях с линейной частотной характеристикой, так и уровни громкости звука в фонах при измерениях с частотными характеристиками, сходными с характеристиками человеческого уха.

Диапазон измерений уровней звуковых давлений находится обычно в пределах от 20—30 дБ до 130—140 дБ относительно стандартного уровня звукового давления $2 \cdot 10^{-5}$ Н/м^2. С помощью сменных микрофонов уровень измерений может быть расширен до 200 дБ.

Частотные характеристики всего тракта шумомера стандартизированы. Шумомер имеет три частотные характеристики, приближенно повторяющие характеристики уха человека для чистых тонов при разных уровнях громкости. Они названы первыми буквами латинского алфавита — *А*, *В* и *С*. Вид этих характеристик показан на рис. 15. Переключатель характеристик независим от переключателя пределов измерений. В области высоких частот диапазон измерений ограничен 8 кГц, поскольку выше 4—5 кГц относительная величина мощности, излучаемая обычными источниками звука, как правило, весьма мала.

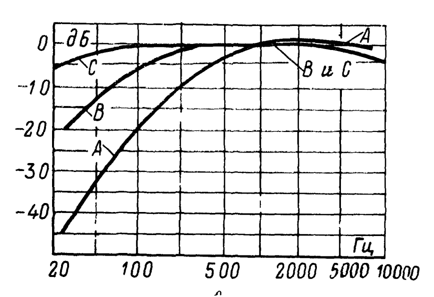


Рис. 15. Стандартные частотные характеристики шумомеров.

Характеристика *А* имитирует ухо на уровне 40 фон. Эта характеристика применяется при измерении малых уровней громкости — до 55 дБ. Характеристика *В* имитирует ухо на уровне 70 фон. Она применяется при измерениях уровней громкости в пределах 55—85 дБ.

Характеристика *С* равномерна в диапазоне 25 Гц—8 кГц. Этой характеристикой пользуются при измерении значительных уровней громкости — от 85 дБ и выше, при измерениях уровней звукового давления независимо от пределов измерения, а также при подключениях к шумомеру анализаторов и фильтров.

При выполнении отсчетов показания стрелочного индикатора алгебраически складываются с показаниями переключателя пределов.

Электронная схема шумомеров содержит обычно и интегрирующую (усредняющую) цепочку с переключателем «быстро — медленно». Когда цепочка отключена («быстро»), стрелка измерителя успевает следить за быстрыми изменениями уровней звука, в положении «медленно» прибор показывает среднее значение измеряемого параметра.

Как отмечалось, корректированные частотные характеристики (кривые *А* и *В*) соответствуют свойствам уха при восприятии чистого тона. Спектральный состав музыкальных звуков и шумов, которые приходится измерять в реальных условиях, чаще всего существенно отличается от чистых тонов и поэтому эти характеристики не очень точно соответствуют уровням громкости сложных шумов и в отдельных случаях субъективная оценка уровня шума может несколько расходиться с показаниями прибора.

При пользовании шумомерами даже опытные операторы нередко забывают переключать частотные характеристики по фактическим уровням громкости. С целью предупреждения ошибок при измерениях и получения единообразных результатов в практических усло-

Таблица 5

Оценка на слух	Уровень шума, дБ	Источник и место измерения шума
Оглушительный	140—170	Реактивные двигатели (вблизи)
	130	Болевой порог (звук воспринимается как боль)
		Поршневые авиадвигатели (2—3 м)
	120	Гром над головой
	110	Быстроходные мощные двигатели (1 м)
		Клепальная машина (2—3 м)
		Очень шумный цех
Очень громкий	100	Симфонический оркестр (пики громкости)
		Деревообрабатывающие станки (на рабочем месте)
	90	Уличный громкоговоритель
		Шумная улица
		Металлорежущие станки (на рабочем месте)
Громкий	80	Радиоприемник громко (2 м)
		Свисток милиционера (15 м)
	70	Машинописное бюро
		Спокойный разговор (1 м)
		Зал большого магазина
Умеренный	60	Улица средней шумности
	50	Легковая машина (10—15 м)
		Жилое помещение
Слабый	40	Шепот
		Читальный зал
	30	Шелест бумаги
	20	Больничная палата
Очень слабый	10	Тихий сад
		Заглушенная комната
	0	Порог слышимости

виях для измерения уровней громкости часто пользуются только частотной характеристикой *A* независимо от уровня интенсивности. Результаты измерений в этом случае условно называют уровнем звука, а измеренные децибелы — децибелами А (дБА).

Для калибровки всего тракта микрофон — измеритель в комплект шумомера обычно входит акустический калибратор, назначение которого — создавать равномерный шум определенного уровня. Простейший калибратор представляет небольшую коробочку, внутри которой мелкие шарики пересыпаются из одной камеры в другую наподобие песочных часов. Шарики при падении создают стабильный шум, равномерный в широкой полосе частот.

Согласно «Санитарным нормам допустимого шума в жилых домах и на территории жилой застройки» установлены следующие допустимые суммарные уровни звука, измеренные на шкале А шумомера.

Жилые комнаты — 30 дБА, площадки отдыха жилых кварталов и территории, прилегающие к жилым домам, — 40 дБА.

Для санитарной оценки уровня шума в показания шумомера, как правило, вносятся поправки в пределах ±(5—10) дБ, учитывающие суммарное время действия шума, месторасположение объекта, характер шума. Например, в дневное время норма допустимого шума в жилых помещениях повышается до 35 дБ.

В зависимости от класса шума ориентировочная норма предельно допустимых уровней характеризуется следующими цифрами.

Класс шума	Предельно допустимый уровень, дБ
Высокочастотный ⩾800 Гц	75 — 85
Среднечастотный 300 — 800 Гц	85 — 90
Низкочастотный ⩽300 Гц	90 — 100

При отсутствии шумомера ориентировочную оценку уровней громкости различных шумов можно производить с помощью табл. 5.

ДЕЦИЛОГИ

Логарифмические единицы используются в настоящее время не только в электронике и акустике, но и во многих других областях науки и техники. В каждой из отраслей оперируют различными физическими величинами и использование логарифмических единиц осуществляется нередко по-разному. В кинофототехнике плотность почернения эмульсии оценивается десятичным логарифмом коэффициента светопоглощения. В химии кислотность и щелочность среды характеризуются так называемым водородным показателем pH, который численно равен логарифму эквивалентной концентрации ионов водорода, взятому с обратным знаком. Для нейтральных сред (вода, спирт и другие) pH=7. Кислотность веществ характеризуется цифрами от 1 до 7 (чем меньше это число, тем сильнее кислота), а щелочи — числами от 7 до 14 (большим числам соответствуют более сильные щелочи).

С целью упорядочения логарифмической системы единиц была предложена унифицированная единица:

$$\mathrm{Dlg} = 10 \lg \frac{N_2}{N_1}; \qquad (50)$$

здесь N_2 и N_1 могут характеризовать самые разнообразные явления — длительности геологических эпох, удаления небесных тел, глубину вакуума, число витков катушек, температуры, напряжения, рубли и т. п.

Чтобы не путать эти единицы с децибелами, для них были предложены другие наименования. Чаще других применяется термин «децилог» с добавлением слова, к которому децилоги относятся: децилоги напряжения, децилоги сопротивления, децилоги времени и пр. Децилоги должны не заменять, а расширять систему децибел. Рассматривая децибелы с общей точки зрения, их можно характеризовать как децилоги мощности.

Децилоги, как любые логарифмические единицы, позволяют подменять умножение сложением, а деление — вычитанием. Из теории усилителей известно, что коэффициент усиления по мощности равен произведению коэффициентов усиления по напряжению и току, т. е.

$$K_p = K_u K_I.$$

В децилогах эта зависимость запишется так:

$$\mathrm{Dlg}\, K_p = \mathrm{Dlg}\, K_u + \mathrm{Dlg}\, K_I.$$

Две величины, связанные обратной пропорциональной зависимостью, например частота и период колебаний, будут выражаться в децилогах одинаковыми числами с обратными знаками.

Если величина одного из членов отношения известна и задана в качестве эталона для сравнения, например N_1, то в этом случае в децилогах однозначно определяется и абсолютное значение второй величины N_2 подобно тому, как однозначно выражаются децибелы относительно нулевого уровня.

Децилог как единица измерения не получил пока официального признания. Внедрение этих единиц в повседневную практику позволило бы в большей степени использовать преимущества логарифмической системы, упростило бы практические применения логарифмических единиц и исключило ошибки от неверного применения коэффициентов 10 или 20 перед знаком логарифма.

ВЫЧИСЛЕНИЕ ДЕЦИБЕЛ БЕЗ ТАБЛИЦ

Таблицы децибел не всегда бывают под руками, и при их отсутствии расчеты, связанные с преобразованием отношений мощностей (напряжений, токов) в децибелы и выполнением обратных действий, легко выполнять с помощью логарифмической линейки. Для расчетов используются основные шкалы на движке и корпусе и шкала мантисс десятичных логарифмов на корпусе.

Если заданы два числа N_1 и N_2, отношения которых надо преобразовать в децибелы, вычисление следует вести в следующей последовательности.

1) Найти отношение N_2/N_1; для удобства предпочтительнее делить большее число на меньшее; 2) определить $\lg N_2/N_1$: мантиссу логарифма по шкалам логарифмов, а характеристику, как n—1,

где n — число значащих цифр в частном N_2/N_1; 3) вычислить $D_p = 10 \lg \frac{N_2}{N_1}$ либо $D_u = 20 \lg \frac{N_2}{N_1}$ в зависимости от того, отношение каких единиц (мощности или напряжения) подлежит преобразованию.

Отношение двух чисел по известным децибелам находится в обратном порядке: 1) $\lg \frac{N_2}{N_1} = \frac{D_p}{10}$ или $\lg \frac{N_2}{N_1} = \frac{D_u}{20}$; 2) $\frac{N_2}{N_1}$ = антилогарифм $\frac{D_p}{10}$ либо $\frac{N_2}{N_1}$ = антилогарифм $\frac{D_u}{20}$.

Вычисления децибел можно выполнять также в уме. Точность расчетов при этом оказывается не хуже 1—1,5 дБ, и удовлетворяет большинству практических случаев.

Для пользования описываемым методом достаточно помнить, что отношению 2 : 1 соответствует 3 дБ по мощности и 6 дБ по напряжению или току. Метод основан на одной закономерности, показанной в табл. 6.

Таблица 6

Отношения	Децибелы мощности	Децибелы напряжения (тока)	Отношения	Децибелы мощности	Децибелы напряжения (тока)
$2=2^1$	3=3·1	6=6·1	$64=2^6$	18=3·6	36=6·6
$4=2^2$	6=3·2	12=6·2	$128=2^7$	21=3·7	42=6·7
$8=2^3$	9=3·3	18=6·3	$256=2^8$	25=3·8	48=6·8
$16=2^4$	12=3·4	24=6·4	$512=2^9$	27=3·9	54=6·9
$32=2^5$	15=3·5	30=6·5	$1\,024=2^{10}$	30=3·10	60=6·10

Из таблицы следует, что если отношение двух чисел представляет степень числа 2, т. е. имеет вид 2^n, то определяющие его децибелы (с достаточной для практики точностью) выражаются как $3n$ (по мощности) или $6n$ (по напряжению или току). Чтобы обратить, например, в децибелы отношение 256 : 1, достаточно вести счет по степеням двух («два, четыре, восемь, шестнадцать, тридцать два» и т. д.), загибая каждый раз палец. Количество согнутых пальцев (в нашем примере 8) покажет, на сколько надо помножить 3 или 6, чтобы получить интересующие децибелы мощности или напряжения (тока).

Для чисел, которых нет в табл. 6, преобразования выполняются в два этапа: сначала пересчет ведется, как было описано выше, до ближайшего меньшего табличного числа. Затем находится разность между заданным и округленным числом (приблизительно, конечно, с округлением в пределах десятка) и так же делается прикладка — какую часть от использованного табличного числа составляет эта разность. Можно допустить с некоторой погрешностью, что отношению 1/3 соответствует 1 дБ мощности (2 дБ напряжения), а отношению 2/3 2 дБ мощности (4 дБ напряжения).

Полученный таким путем результат складывается с числом, рассчитанным ранее, давая окончательный итог. Если при чтении

этот способ может показаться сложным и неудобным, то, проделав несколько примеров, можно легко убедиться в его простоте.

Пример 1. Перевести в децибелы отношение напряжений $U_2/U_1=43:1$. Ближайшее меньшее число, представляющее степень двойки будет $32=2^5$, которому соответствует $D_u=6\cdot5=30$ дБ. Разность между заданным и округленным отношением $43-32=11$. Число 11 от 32 составляет $11/32\approx1/3$, что дает еще 2 дБ. Следовательно, отношение $U_2/U_1=43$ приблизительно $D_u=30+2=32$ дБ. Точный ответ будет 32,7 дБ.

Пример 2. Пересчитать в отношение мощностей 13,8 дБ. Округляя заданные децибелы до 12 (ближайшее меньшее число, которое делится на 3), переводим их в отношение мощностей: $12:3=4$, $P_2/P_1=2^4=16$. Разность между заданным и округленным значениями децибел $13{,}8-12=1{,}8\approx2$ дБ, что составляет $\frac{2}{3}\cdot16\approx$ ≈10. Значит, 13,8 дБ приблизительно соответствует $P_2/P_1=16+10=$ $=26$ (точный ответ 24).

Проделав еще несколько примеров и контролируя себя таблицей, можно научиться быстро и безошибочно выполнять децибельные пересчеты.

Пересчет децибел в отношения напряжений, токов и мощностей (децибелы положительные, отношения больше единицы)

дБ	Отношение напряжений (токов)	Отношение мощностей	дБ	Отношение напряжений (токов)	Отношение мощностей
0,0	1,000	1,000	4,0	1,585	2,512
0,1	1,012	1,023	4,1	1,603	2,570
0,2	1,023	1,047	4,2	1,622	2,630
0,3	1,035	1,072	4,3	1,641	2,692
0,4	1,047	1,096	4,4	1,660	2,754
0,5	1,059	1,122	4,5	1,679	2,818
0,6	1,072	1,148	4,6	1,698	2,884
0,7	1,084	1,175	4,7	1,718	2,951
0,8	1,096	1,202	4,8	1,738	3,020
0,9	1,109	1,230	4,9	1,758	3,090
1,0	1,122	1,259	5,0	1,778	3,162
1,1	1,135	1,288	5,1	1,799	3,236
1,2	1,148	1,318	5,2	1,820	3,311
1,3	1,161	1,349	5,3	1,841	3,388
1,4	1,175	1,380	5,4	1,862	3,467
1,5	1,189	1,413	5,5	1,884	3,548
1,6	1,202	1,445	5,6	1,905	3,631
1,7	1,216	1,479	5,7	1,928	3,715
1,8	1,230	1,514	5,8	1,950	3,802
1,9	1,245	1,549	5,9	1,972	3,890
2,0	1,259	1,585	6,0	1,995	3,981
2,1	1,274	1,622	6,1	2,018	4,074
2,2	1,288	1,660	6,2	2,042	4,169
2,3	1,303	1,698	6,3	2,065	4,266
2,4	1,318	1,738	6,4	2,089	4,365
2,5	1,334	1,778	6,5	2,113	4,467
2,6	1,349	1,820	6,6	2,138	4,571
2,7	1,365	1,862	6,7	2,163	4,677
2,8	1,380	1,905	6,8	2,188	4,786
2,9	1,396	1,950	6,9	2,213	4,898
3,0	1,413	1,995	7,0	2,239	5,012
3,1	1,429	2,042	7,1	2,265	5,129
3,2	1,445	2,089	7,2	2,291	5,248
3,3	1,462	2,138	7,3	2,317	5,370
3,4	1,479	2,188	7,4	2,344	5,495
3,5	1,496	2,239	7,5	2,371	5,623
3,6	1,514	2,291	7,6	2,399	5,754
3,7	1,531	2,344	7,7	2,427	5,888
3,8	1,549	2,399	7,8	2,455	6,026
3,9	1,567	2,455	7,9	2,483	6,166

дБ	Отношение напряжений (токов)	Отношение мощностей	дБ	Отношение напряжений (токов)	Отношение мощностей
8,0	2,512	6,310	12,5	4,217	17,78
8,1	2,541	6,457	12,6	4,266	18,20
8,2	2,570	6,607	12,7	4,315	18,62
8,3	2,600	6,761	12,8	4,365	19,05
8,4	2,630	6,918	12,9	4,416	19,50
8,5	2,661	7,079	13,0	4,467	19,95
8,6	2,692	7,244	13,1	4,519	20,42
8,7	2,723	7,413	13,2	4,571	20,89
8,8	2,754	7,586	13,3	4,624	21,38
8,9	2,786	7,762	13,4	4,677	21,88
9,0	2,818	7,943	13,5	4,732	22,39
9,1	2,851	8,128	13,6	4,786	22,91
9,2	2,884	8,318	13,7	4,842	23,44
9,3	2,917	8,511	13,8	4,898	23,99
9,4	2,951	8,710	13,9	4,955	24,55
9,5	2,985	8,913	14,0	5,012	25,12
9,6	3,020	9,120	14,1	5,070	25,70
9,7	3,055	9,333	14,2	5,129	26,30
9,8	3,090	9,550	14,3	5,188	26,92
9,9	3,126	9,772	14,4	5,248	27,54
10,0	3,162	10,000	14,5	5,309	28,18
10,1	3,199	10,23	14,6	5,370	28,84
10,2	3,236	10,47	14,7	5,433	29,51
10,3	3,273	10,72	14,8	5,495	30,20
10,4	3,311	10,96	14,9	5,559	30,90
10,5	3,350	11,22	15,0	5,623	31,62
10,6	3,388	11,48	15,1	5,689	32,36
10,7	3,428	11,75	15,2	5,754	33,11
10,8	3,467	12,02	15,3	5,821	33,88
10,9	3,508	12,30	15,4	5,888	34,67
11,0	3,548	12,59	15,5	5,957	35,48
11,1	3,589	12,88	15,6	6,026	36,31
11,2	3,631	13,18	15,7	6,095	37,15
11,3	3,673	13,49	15,8	6,166	38,02
11,4	3,715	13,80	15,9	6,237	38,90
11,5	3,758	14,13	16,0	6,310	39,81
11,6	3,802	14,45	16,1	6,383	40,74
11,7	3,846	14,79	16,2	6,457	41,69
11,8	3,890	15,14	16,3	6,531	42,66
11,9	3,936	15,49	16,4	6,607	43,65
12,0	3,981	15,85	16,5	6,683	44,67
12,1	4,027	16,22	16,6	6,761	45,71
12,2	4,074	16,60	16,7	6,839	46,77
12,3	4,121	16,98	16,8	6,918	47,86
12,4	4,169	17,38	16,9	6,998	48,98

дБ	Отношение напряжений (токов)	Отношение мощностей	дБ	Отношение напряжений (токов)	Отношение мощностей
17,0	7,079	50,12	19,0	8,913	79,43
17,1	7,161	51,29	19,1	9,016	81,28
17,2	7,244	52,48	19,2	9,120	83,18
17,3	7,328	53,70	19,3	9,226	85,11
17,4	7,413	54,95	19,4	9,333	87,10
17,5	7,499	56,23	19,5	9,441	89,13
17,6	7,586	57,54	19,6	9,550	91,20
17,7	7,674	58,88	19,7	9,661	93,33
17,8	7,762	60,26	19,8	9,772	95,50
17,9	7,852	61,66	19,9	9,886	97,72
18,0	7,943	63,10	20,0	10,000	100,00
18,1	8,035	64,57	25,0	17,78	316,2
18,2	8,128	66,07	30,0	31,62	1000,0
18,3	8,222	67,61	35,0	56,23	3162
18,4	8,318	69,18	40,0	100,00	10^4
18,5	8,414	70,79	45,0	177,8	$3,162\cdot10^4$
18,6	8,511	72,44	50,0	316,2	10^5
18,7	8,610	74,13	55,0	562,3	$3,162\cdot10^5$
18,8	8,710	75,86	60,0	1 000	10^6
18,9	8,810	77,62			

Приложение 2

Пересчет децибел в отношения напряжений (токов) и мощностей (децибелы отрицательные, отношения меньше единицы)

дБ	Отношение напряжений (токов)	Отношение мощностей	дБ	Отношение напряжений (токов)	Отношение мощностей
0,0	1,0000	1,0000	1,5	0,8414	0,7079
0,1	0,9886	0,9772	1,6	0,8318	0,6918
0,2	0,9772	0,9550	1,7	0,8222	0,6761
0,3	0,9661	0,9333	1,8	0,8128	0,6607
0,4	0,9550	0,9120	1,9	0,8035	0,6457
0,5	0,9441	0,8913	2,0	0,7943	0,6310
0,6	0,9333	0,8710	2,1	0,7852	0,6166
0,7	0,9226	0,8511	2,2	0,7762	0,6026
0,8	0,9120	0,8318	2,3	0,7674	0,5888
0,9	0,9016	0,8128	2,4	0,7586	0,5754
1,0	0,8913	0,7943	2,5	0,7499	0,5623
1,1	0,8810	0,7762	2,6	0,7413	0,5495
1,2	0,8710	0,7586	2,7	0,7328	0,5370
1,3	0,8610	0,7413	2,8	0,7244	0,5248
1,4	0,8511	0,7244	2,9	0,7161	0,5129

—дБ	Отношение напряжений (токов)	Отношение мощностей	—дБ	Отношение напряжений (токов)	Отношение мощностей
3,0	0,7079	0,5012	7,5	0,4217	0,1778
3,1	0,6998	0,4898	7,6	0,4169	0,1738
3,2	0,6918	0,4786	7,7	0,4121	0,1698
3,3	0,6839	0,4677	7,8	0,4074	0,1660
3,4	0,6761	0,4571	7,9	0,4027	0,1622
3,5	0,6683	0,4467	8,0	0,3981	0,1585
3,6	0,6607	0,4365	8,1	0,3936	0,1549
3,7	0,6531	0,4266	8,2	0,3890	0,1514
3,8	0,6457	0,4169	8,3	0,3846	0,1479
3,9	0,6383	0,4074	8,4	0,3802	0,1445
4,0	0,6310	0,3981	8,5	0,3758	0,1413
4,1	0,6237	0,3890	8,6	0,3715	0,1380
4,2	0,6166	0,3802	8,7	0,3673	0,1349
4,3	0,6095	0,3715	8,8	0,3631	0,1318
4,4	0,6026	0,3631	8,9	0,3589	0,1288
4,5	0,5957	0,3548	9,0	0,3548	0,1259
4,6	0,5888	0,3467	9,1	0,3508	0,1230
4,7	0,5821	0,3388	9,2	0,3467	0,1202
4,8	0,5754	0,3311	9,3	0,3428	0,1175
4,9	0,5689	0,3236	9,4	0,3388	0,1148
5,0	0,5623	0,3162	9,5	0,3350	0,1122
5,1	0,5559	0,3090	9,6	0,3311	0,1096
5,2	0,5495	0,3020	9,7	0,3273	0,1072
5,3	0,5433	0,2951	9,8	0,3236	0,1047
5,4	0,5370	0,2884	9,9	0,3199	0,1023
5,5	0,5309	0,2818	10,0	0,3162	0,1000
5,6	0,5248	0,2754	10,1	0,3126	0,09772
5,7	0,5188	0,2692	10,2	0,3090	0,09550
5,8	0,5129	0,2630	10,3	0,3055	0,09333
5,9	0,5070	0,2570	10,4	0,3020	0,09120
6,0	0,5012	0,2512	10,5	0,2985	0,08913
6,1	0,4955	0,2455	10,6	0,2951	0,08710
6,2	0,4898	0,2399	10,7	0,2917	0,08511
6,3	0,4842	0,2344	10,8	0,2884	0,08318
6,4	0,4786	0,2291	10,9	0,2851	0,08128
6,5	0,4732	0,2239	11,0	0,2818	0,07943
6,6	0,4677	0,2188	11,1	0,2786	0,07762
6,7	0,4624	0,2138	11,2	0,2754	0,07586
6,8	0,4571	0,2089	11,3	0,2723	0,07413
6,9	0,4519	0,2042	11,4	0,2692	0,07244
7,0	0,4467	0,1995	11,5	0,2661	0,07079
7,1	0,4416	0,1950	11,6	0,2630	0,06918
7,2	0,4365	0,1905	11,7	0,2600	0,06761
7,3	0,4315	0,1862	11,8	0,2570	0,06607
7,4	0,4266	0,1820	11,9	0,2541	0,06457

—дБ	Отношение напряжений (токов)	Отношение мощностей	—дБ	Отношение напряжений (токов)	Отношение мощностей
12,0	0,2512	0,06310	16,5	0,1496	0,02239
12,1	0,2483	0,06166	16,6	0,1479	0,02188
12,2	0,2455	0,06026	16,7	0,1462	0,02138
12,3	0,2427	0,05888	16,8	0,1445	0,02089
12,4	0,2399	0,05754	16,9	0,1429	0,02042
12,5	0,2371	0,05623	17,0	0,1413	0,01995
12,6	0,2344	0,05495	17,1	0,1396	0,01950
12,7	0,2317	0,05370	17,2	0,1380	0,01905
12,8	0,2291	0,05248	17,3	0,1365	0,01862
12,9	0,2265	0,05129	17,4	0,1349	0,01820
13,0	0,2239	0,05012	17,5	0,1334	0,01778
13,1	0,2213	0,04898	17,6	0,1318	0,01738
13,2	0,2188	0,04786	17,7	0,1303	0,01698
13,3	0,2163	0,04677	17,8	0,1288	0,01660
13,4	0,2138	0,04571	17,9	0,1274	0,01622
13,5	0,2113	0,04467	18,0	0,1259	0,01585
13,6	0,2089	0,04365	18,1	0,1245	0,01549
13,7	0,2065	0,04266	18,2	0,1230	0,01514
13,8	0,2042	0,04169	18,3	0,1216	0,01479
13,9	0,2018	0,04074	18,4	0,1202	0,01445
14,0	0,1995	0,03981	18,5	0,1189	0,01413
14,1	0,1972	0,03890	18,6	0,1175	0,01380
14,2	0,1950	0,03802	18,7	0,1161	0,01349
14,3	0,1928	0,03715	18,8	0,1148	0,01318
14,4	0,1905	0,03631	18,9	0,1135	0,01288
14,5	0,1884	0,03548	19,0	0,1122	0,01259
14,6	0,1862	0,03467	19,1	0,1109	0,01230
14,7	0,1841	0,03388	19,2	0,1096	0,01202
14,8	0,1820	0,03311	19,3	0,1084	0,01175
14,9	0,1799	0,03236	19,4	0,1072	0,01148
15,0	0,1778	0,03162	19,5	0,1059	0,01122
15,1	0,1758	0,03090	19,6	0,1047	0,01096
15,2	0,1738	0,03020	19,7	0,1035	0,01072
15,3	0,1718	0,02951	19,8	0,1023	0,01047
15,4	0,1698	0,02884	19,9	0,1012	0,01023
15,5	0,1679	0,02818	20,0	0,1000	0,01000
15,6	0,1660	0,02754	25,0	0,0562	$3{,}162\cdot10^{-3}$
15,7	0,1641	0,02692	30,0	0,0316	0,001
15,8	0,1622	0,02630	35,0	0,0178	$3{,}162\cdot10^{-4}$
15,9	0,1603	0,02570	40,0	0,0100	10^{-4}
16,0	0,1585	0,02512	45,0	0,0056	$3{,}162\cdot10^{-5}$
16,1	0,1567	0,02455	50,0	0,0032	10^{-5}
16,2	0,1549	0,02399	55,0	0,0018	$3{,}162\cdot10^{-6}$
16,3	0,1531	0,02344	60,0	0,0010	10^{-6}
16,4	0,1514	0,02291			

Приложение 3

Пересчет децибел в единицы напряжения, тока и мощности при стандартном нулевом уровне, 1 мВт, 600 Ом

дБ	*U*, мВ	*I*, мА	*P*, мВт	дБ	*U*, В	*I*, мА	*P*, мВт
—20	77,5	0,1291	0,0100	+0,5	0,8105	1,351	1,122
—19	86,9	0,1448	0,0126	1,0	0,8691	1,448	1,26
—18	97,5	0,1625	0,0158	1,5	0,9108	1,518	1,41
—17	109,5	0,1825	0,0199	2,0	0,9752	1,625	1,58
—16	122,8	0,2046	0,0251	2,5	1,033	1,722	1,78
—15	137,7	0,2295	0,0316	3,0	1,094	1,825	1,99
—14	154,5	0,2576	0,0398	3,5	1,159	1,932	2,24
—13	173,2	0,2887	0,0501	4,0	1,228	2,046	2,51
—12	194,6	0,3243	0,0631	4,5	1,300	2,167	2,82
—11	218,3	0,3638	0,794	5,0	1,377	2,295	3,16
—10	244,9	0,4082	0,100	5,5	1,459	2,432	3,55
—9,5	259,4	0,4324	0,112	6,0	1,546	2,576	3,98
—9	274,8	0,4581	0,126	6,5	1,637	2,729	4,47
—8,5	291,0	0,4851	0,141	7,0	1,732	2,887	5,01
—8	308,4	0,5139	0,158	7,5	1,836	3,060	5,62
—7,5	326,5	0,5443	0,178	8,0	1,946	3,243	6,31
—7	347,4	0,5790	0,199	8,5	2,061	3,436	7,08
—6,5	366,5	0,6109	0,224	9,0	2,183	3,638	7,94
—6	383,2	0,6470	0,251	9,5	2,312	3,854	8,91
—5,5	401,1	0,6686	0,282	10,0	2,449	4,082	10,0
—5	435,6	0,7259	0,316	11	2,748	4,581	12,6
—4,5	451,4	0,7525	0,355	12	3,083	5,139	15,8
—4	488,7	0,8145	0,398	13	3,474	5,790	19,9
—3,5	517,7	0,8630	0,447	14	3,882	6,470	25,1
—3	548,4	0,9139	0,501	15	4,356	7,259	31,6
—2,5	570,8	0,9515	0,562	16	4,887	8,145	39,8
—2	615,3	1,025	0,631	17	5,484	9,139	50,1
—1,5	641,7	1,070	0,708	18	6,153	10,255	63,1
—1	690,4	1,150	0,794	19	6,903	11,505	79,4
—0,5	721,2	1,202	0,891	20	7,746	12,909	100
0	774,6	1,291	1,000				

Приложение 4

Пересчет непер в отношения напряжений, токов и мощностей (неперы положительные, отношения больше единицы)

Нп	Отношения напряжений (токов)	Отношения мощностей	Нп	Отношения напряжений (токов)	Отношения мощностей
0,01	1,010	1,020	0,06	1,062	1,128
0,02	1,020	1,041	0,07	1,073	1,150
0,03	1,030	1,062	0,08	1,083	1,174
0,04	1,041	1,083	0,09	1,094	1,197
0,05	1,051	1,105	0,10	1,105	1,221

Нп	Отношения напряжений (токов)	Отношения мощностей	Нп	Отношения напряжений (токов)	Отношения мощностей
0,15	1,162	1,350	3,8	44,70	1 998
0,20	1,221	1,492	3,9	49,40	2 441
0,25	1,284	1,649	4,0	54,60	2 981
0,30	1,350	1,822	4,1	60,34	3 641
0,35	1,419	2,014	4,2	66,69	4 447
0,40	1,492	2,226	4,3	73,70	5 432
0,45	1,568	2,460	4,4	81,45	6 634
0,50	1,649	2,718	4,5	90,02	8 103
0,55	1,733	3,004	4,6	99,48	9 897
0,60	1,822	3,32	4,7	110,0	12 090
0,65	1,916	3,669	4,8	121,5	14 770
0,70	2,014	4,055	4,9	134,3	18 030
0,75	2,117	4,482	5,0	148,4	22 030
0,80	2,226	4,953	5,1	164,0	26 900
0,85	2,340	5,474	5,2	181,3	32 860
0,90	2,460	6,050	5,3	200,3	40 130
0,95	2,586	6,686	5,4	221,4	49 020
1,00	2,718	7,389	5,5	244,7	59 870
1,10	3,004	9,025	5,6	270,4	73 130
1,20	3,320	11,02	5,7	298,9	89 320
1,30	3,669	13,46	5,8	330,3	109 100
1,40	4,055	16,44	5,9	365,0	133 200
1,50	4,482	20,09	6,0	403,4	162 750
1,60	4,953	24,53	6,1	445,9	198 800
1,70	5,474	29,96	6,2	492,8	242 800
1,80	6,050	36,60	6,3	544,6	292 500
1,90	6,686	44,70	6,4	601,8	366 200
2,00	7,389	54,60	6,5	665,1	442 410
2,10	8,166	66,69	6,6	735,1	540 400
2,20	9,025	81,45	6,7	812,4	660 000
2,3	9,974	99,48	6,8	897,8	806 100
2,4	11,02	121,05	6,9	992,3	984 600
2,5	12,18	148,4	7,0	1 097	1 202 300
2,6	13,46	181,3	7,2	1 339	1 794 000
2,7	14,88	221,4	7,4	1 636	2 676 000
2,8	16,44	270,4	7,6	1 998	3 993 000
2,9	18,17	330,3	7,8	2 441	5 956 000
3,0	20,09	403,4	8,0	2 981	8 886 100
3,1	22,20	492,8	8,2	3 641	$13,26 \cdot 10^6$
3,2	24,53	601,8	8,4	4 447	$19,78 \cdot 10^6$
3,3	27,11	735,1	8,6	5 432	$29,50 \cdot 10^6$
3,4	29,96	897,8	8,8	6 634	$44,01 \cdot 10^6$
3,5	33,12	1 097	9,0	8 103	$65,66 \cdot 10^6$
3,6	36,60	1 339	9,2	9 897	$97,95 \cdot 10^6$
3,7	40,45	1 636	9,4	12 090	$146,1 \cdot 10^6$

Нп	Отношения напряжений (токов)	Отношения мощностей	Нп	Отношения напряжений (токов)	Отношения мощностей
9,6	14 770	$218 \cdot 10^6$	10,0	22 026	$485,2 \cdot 10^6$
9,8	18 030	$325,2 \cdot 10^6$			

Приложение 5

Пересчет непер в децибелы

Нп	дБ	Нп	дБ	Нп	дБ	Нп	дБ
0,1	0,869	2,6	22,6	5,1	44,3	7,6	66,0
0,2	1,74	2,7	23,5	5,2	45,2	7,7	66,9
0,3	2,61	2,8	24,3	5,3	46,2	7,8	67,8
0,4	3,47	2,9	25,2	5,4	46,9	7,9	68,6
0,5	4,34	3,0	26,1	5,5	47,8	8,0	69,5
0,6	5,21	3,1	26,9	5,6	48,6	8,1	70,4
0,7	6,08	3,2	27,8	5,7	49,5	8,2	71,2
0,8	6,95	3,3	28,7	5,8	50,4	8,3	72,1
0,9	7,81	3,4	29,5	5,9	51,2	8,4	73,0
1,0	8,69	3,5	30,4	6,0	52,1	8,5	73,8
1,1	9,55	3,6	31,3	6,1	53,0	8,6	74,7
1,2	10,4	3,7	32,1	6,2	53,9	8,7	75,6
1,3	11,3	3,8	33,0	6,3	54,7	8,8	76,4
1,4	12,2	3,9	33,9	6,4	55,6	8,9	77,3
1,5	13,0	4,0	34,7	6,5	56,5	9,0	78,2
1,6	13,9	4,1	35,6	6,6	57,3	9,1	79,0
1,7	14,8	4,2	36,5	6,7	58,2	9,2	79,9
1,8	15,6	4,3	37,3	6,8	59,1	9,3	80,8
1,9	16,5	4,4	38,2	6,9	59,9	9,4	81,6
2,0	17,4	4,5	39,1	7,0	60,8	9,5	82,5
2,1	18,2	4,6	40,0	7,1	61,7	9,6	83,4
2,2	19,1	4,7	40,8	7,2	62,5	9,7	84,3
2,3	20,0	4,8	41,7	7,3	63,4	9,8	85,1
2,4	21,0	4,9	42,6	7,4	64,3	9,9	86,0
2,5	21,7	5,0	43,4	7,5	65,1	10,0	86,9

Приложение 6

Пересчет децибел в неперы

дБ	Нп	дБ	Нп	дБ	Нп	дБ	Нп
1	0,115	6	0,691	11	1,27	16	1,84
2	0,230	7	0,806	12	1,38	17	1,96
3	0,345	8	0,921	13	1,50	18	2,07
4	0,461	9	1,04	14	1,61	19	2,19
5	0,576	10	1,15	15	1,73	20	2,30

дБ	Нп	дБ	Нп	дБ	Нп	дБ	Нп
21	2,42	41	4,72	61	7,02	81	9,33
22	2,53	42	4,84	62	7,14	82	9,44
23	2,65	43	4,95	63	7,25	83	9,56
24	2,76	44	5,07	64	7,37	84	9,67
25	2,88	45	5,18	65	7,48	85	9,79
26	2,99	46	5,30	66	7,60	86	9,90
27	3,11	47	5,41	67	7,71	87	10,0
28	3,22	48	5,53	68	7,83	88	10,1
29	3,34	49	5,64	69	7,94	89	10,2
30	3,45	50	5,76	70	8,06	90	10,4
31	3,57	51	5,87	71	8,17	91	10,5
32	3,68	52	5,99	72	8,29	92	10,6
33	3,80	53	6,10	73	8,40	93	10,7
34	3,91	54	6,22	74	8,52	94	10,8
35	4,03	55	6,33	75	8,63	95	10,9
36	4,14	56	6,45	76	8,75	96	11,1
37	4,26	57	6,56	77	8,87	97	11,2
38	4,37	58	6,68	78	8,98	98	11,3
39	4,49	59	6,79	79	9,10	99	11,4
40	4,61	60	6,91	80	9,21	100	11,5

ПРИЛОЖЕНИЕ 7

Расшифровка условных буквенных сокращений

В иностранной литературе — оригинальной и переводной — к основному знаку децибел нередко приписываются дополнительные буквы в скобках или без скобок, условно характеризующие вид децибел либо нулевой уровень, относительно которого ведется отсчет. Эти буквенные обозначения расшифровываются следующим образом.

dB — общее обозначение децибел; нулевой уровень 6 мВт (1,73 В, 500 Ом)
dBA — децибелы А — шумы, замеренные шумомером с частотной характеристикой А
dBK — нулевой уровень 1 кВ
dBM — нулевой уровень 1 мВт (0,775 В, 600 Ом)
dBV — нулевой уровень 1 В
dBW — нулевой уровень 1 Вт
dBX — измерение перекрестных искажений
dBRN — отношение шумов к заданному уровню отсчета
dBVG — децибелы усиления по напряжению
dBRAP — уровень акустической мощности относительно нулевого уровня 10^{-13} Вт.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Цена 16 коп.